N°d'ordre NNT : 2024ISAL0115

THESE de DOCTORAT DE L'INSA LYON,
membre de l'Université de Lyon

Ecole Doctorale N° 206
(Ecole doctorale de Chimie de Lyon)

Spécialité/ discipline de doctorat : Environnement

Soutenue publiquement le 12/12/2024, par :
Alice-Rose Thomas

Application de l'approche Multi-barrières pour la réutilisation des eaux usées traitées :
Construction d'un outil de simulation participative pour accompagner l'évaluation et la gestion des risques associés aux micro-organismes pathogènes

---

Devant le jury composé de :

COURAULT, Dominique	Directrice de recherche	INRAE	Rapporteure
BECU, Nicolas	Directeur de recherche	CNRS	Rapporteur
BAYARD, Rémy	Professeur des universités	INSA-Lyon	Président
GRIMBUHLER, Sonia	Ingénieure de recherche	INRAE	Examinatrice
MOLLE, Pascal	Directeur de recherche	INRAE	Directeur de thèse
LOMBARD-LATUNE, Rémi	Ingénieur de recherche	INRAE	Encadrant de thèse
HASSENFORDER, Emeline	Chercheuse	CIRAD	Encadrante de thèse
DECLERCQ, Rémi	Directeur R&D	ECOFILAE	Encadrant de thèse
ARNAULT, Camille	Chargée d'études	AE RMC	Invitée

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Département de la Formation par la Recherche et des Études Doctorales (**FEDORA**)

Bâtiment Charlotte Perriand 3e étage 17,
av. des Arts
69621 Villeurbanne Cédex
fedora@insa-lyon.fr

Référence : TH1185_THOMAS Alice-Rose

L'INSA Lyon a mis en place une procédure de contrôle systématique via un outil de détection de similitudes (logiciel Compilatio). Après le dépôt du manuscrit de thèse, celui-ci est analysé par l'outil. Pour tout taux de similarité supérieur à 10%, le manuscrit est vérifié par l'équipe de FEDORA. Il s'agit notamment d'exclure les auto-citations, à condition qu'elles soient correctement référencées avec citation expresse dans le manuscrit.

Par ce document, il est attesté que ce manuscrit, dans la forme communiquée par la personne doctorante à l'INSA Lyon, satisfait aux exigences de l'Etablissement concernant le taux maximal de similitude admissible.

INSA LYON
Campus LyonTech La Doua
20, avenue Albert Einstein - 69621 Villeurbanne cedex - France
Tél. +33 (0)4 72 43 83 83 - Fax +33 (0)4 72 43 85 00
www.insa-lyon.fr

membre de UNIVERSITÉ DE LYON

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

Département FEDORA – INSA Lyon - Ecoles Doctorales

SIGLE	ECOLE DOCTORALE	NOM ET COORDONNEES DU RESPONSABLE
ED 206 CHIMIE	**CHIMIE DE LYON** https://www.edchimie-lyon.fr Sec. : Renée EL MELHEM Bât. Blaise PASCAL, 3e étage secretariat@edchimie-lyon.fr	**M. Stéphane DANIELE** C2P2-CPE LYON-UMR 5265 Bâtiment F308, BP 2077 43 Boulevard du 11 novembre 1918 69616 Villeurbanne directeur@edchimie-lyon.fr
ED 341 E2M2	**ÉVOLUTION, ÉCOSYSTÈME, MICROBIOLOGIE, MODÉLISATION** http://e2m2.universite-lyon.fr Sec. : Bénédicte LANZA Bât. Atrium, UCB Lyon 1 Tél : 04.72.44.83.62 secretariat.e2m2@univ-lyon1.fr	**Mme Sandrine CHARLES** Université Claude Bernard Lyon 1 UFR Biosciences Bâtiment Mendel 43, boulevard du 11 Novembre 1918 69622 Villeurbanne CEDEX e2m2.codir@listes.univ-lyon1.fr
ED 205 EDISS	**INTERDISCIPLINAIRE SCIENCES-SANTÉ** http://ediss.universite-lyon.fr Sec. : Bénédicte LANZA Bât. Atrium, UCB Lyon 1 Tél : 04.72.44.83.62 secretariat.ediss@univ-lyon1.fr	**Mme Sylvie RICARD-BLUM** Laboratoire ICBMS - UMR 5246 CNRS - Université Lyon 1 Bâtiment Raulin - 2ème étage Nord 43 Boulevard du 11 novembre 1918 69622 Villeurbanne Cedex Tél : +33(0)4 72 44 82 32 sylvie.ricard-blum@univ-lyon1.fr
ED 34 EDML	**MATÉRIAUX DE LYON** http://ed34.universite-lyon.fr Sec. : Yann DE ORDENANA Tél : 04.72.18.62.44 yann.de-ordenana@ec-lyon.fr	**M. Stéphane BENAYOUN** Ecole Centrale de Lyon Laboratoire LTDS 36 avenue Guy de Collongue 69134 Ecully CEDEX Tél : 04.72.18.64.37 stephane.benayoun@ec-lyon.fr
ED 160 EEA	**ÉLECTRONIQUE, ÉLECTROTECHNIQUE, AUTOMATIQUE** https://edeea.universite-lyon.fr Sec. : Philomène TRECOURT Bâtiment Direction INSA Lyon Tél : 04.72.43.71.70 secretariat.edeea@insa-lyon.fr	**M. Philippe DELACHARTRE** INSA LYON Laboratoire CREATIS Bâtiment Blaise Pascal, 7 avenue Jean Capelle 69621 Villeurbanne CEDEX Tél : 04.72.43.88.63 philippe.delachartre@insa-lyon.fr
ED 512 INFOMATHS	**INFORMATIQUE ET MATHÉMATIQUES** http://edinfomaths.universite-lyon.fr Sec. : Renée EL MELHEM Bât. Blaise PASCAL, 3e étage Tél : 04.72.43.80.46 infomaths@univ-lyon1.fr	**M. Dragos IFTIMIE** Université Claude Bernard Lyon 1 Bâtiment Braconnier (ex-101) 21 Avenue Claude Bernard 69622 VILLEURBANNE Cedex Tél : 04.72.44.79.58 direction.infomaths@listes.univ-lyon1.fr
ED 162 MEGA	**MÉCANIQUE, ÉNERGÉTIQUE, GÉNIE CIVIL, ACOUSTIQUE** http://edmega.universite-lyon.fr Sec. : Philomène TRECOURT Tél : 04.72.43.71.70 Bâtiment Direction INSA Lyon mega@insa-lyon.fr	**M. Etienne PARIZET** INSA Lyon Laboratoire LVA Bâtiment St. Exupéry 25 bis av. Jean Capelle 69621 Villeurbanne CEDEX etienne.parizet@insa-lyon.fr
ED 483 ScSo	**ScSo**[1] https://edsciencessociales.universite-lyon.fr Sec. : Mélina FAVETON Tél : 04.78.69.77.79 melina.faveton@univ-lyon2.fr	**M. Bruno MILLY** (INSA : J.Y. TOUSSAINT) Univ. Lyon 2 Campus Berges du Rhône 18, quai Claude Bernard 69365 LYON CEDEX 07 Bureau BEL 319 bruno.milly@univ-lyon2.fr

[1] ScSo : Histoire, Géographie, Aménagement, Urbanisme, Archéologie, Science politique, Sociologie, Anthropologie

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

Application de l'approche Multi-barrières pour la réutilisation des eaux usées traitées :

Construction d'un outil de simulation participative pour accompagner l'évaluation et la gestion des risques associés aux micro-organismes pathogènes



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

Résumé

Ces travaux de recherche s'intéressent à la construction collective de la gestion intégrée des risques microbiologiques et aux apports qu'elle pourrait avoir pour des filières de réutilisation des eaux usées traitées (REUT) plus durables. En effet, les exigences de qualité pour gérer les risques microbiologiques associés à la REUT sont de plus en plus strictes. L'ajout de procédés de traitement complémentaires est souvent nécessaire, menaçant alors l'équilibre économique des projets et questionnant leur bilan environnemental. Cependant, dans ses directives de 2006, l'Organisation mondiale de la santé encourage une gestion des risques qui ne repose pas uniquement sur le traitement mais également sur les pratiques mises en place et les équipements mobilisés. Cette approche, appelée « multi-barrières », est plus intégrée et systémique. Elle implique donc un plus large ensemble d'acteurs dans la gestion des risques et appelle à une construction collective des choix de gestion.

Un outil de simulation participative, appelé Multiware, a été construit notamment grâce à un processus de modélisation d'accompagnement, mené avec une partie des acteurs du cas de REUT agricole de Clermont-Ferrand. Il prend la forme d'un jeu de rôles qui comprend différents supports physiques (plateau, cartes…) mais aussi un support informatique. L'objectif pour les joueurs est de créer, tester et simuler collectivement des scénarios de gestion des risques (tout traitement, multi-barrières…) et discuter les impacts associés (sanitaires, économiques ou encore organisationnels). Le support informatique comprend un modèle d'évaluation et de gestion des risques, qui intègre un modèle d'évaluation quantitative des risques (QMRA) et une base de données sur les mesures barrières envisageables. L'outil a été utilisé sur le cas de Clermont-Ferrand pour discuter les choix de gestion envisageable et construire un plan de gestion des risques pour la mise en conformité vis-à-vis du nouveau cadre réglementaire (arrêté du 18/12/2023). Il a également été utilisé avec le cas de Porquerolles et avec un projet de REUT agricole en cours de construction dans la Drôme.

La construction collective des scénarios par différentes parties prenantes permet un apport d'informations nécessaires à la construction de la gestion des risques microbiologiques au-delà des aspects sanitaires : considérations économiques, spécificités locales, enjeux organisationnels, enjeux sociétaux … Elle contribue également à confronter les représentations notamment sur les risques associés à la REUT et à l'expression des attentes, des besoins mais aussi des questionnements individuels. Par exemple, l'identification collective des populations exposées a confirmé les résultats de la littérature concernant l'hétérogénéité des perceptions et le besoin d'en discuter collectivement. Le processus de construction collective de l'approche « conventionnelle » de gestion basée sur l'atteinte de critères de qualité a montré les limites associées à cette approche d'un point de vue sanitaire mais aussi pour construire des filières de REUT durables. En adoptant une approche de gestion basée sur la dose d'exposition plutôt que sur la concentration dans les EUT, la contribution non-négligeable des pratiques culturales et d'irrigation mises en place et des équipements utilisés au-delà du traitement pour réduire les risques pour les populations exposées a été mis en lumière. L'intérêt d'une gestion plus systémique et intégrée des risques est montré. Néanmoins, des questionnements persistent concernant les paramètres du modèle d'évaluation et de gestion des risques intégré dans l'outil. De plus, les effets sur les participants et la portée des résultats produits par le dispositif doivent être confirmés par la réalisation d'ateliers supplémentaires. Le dispositif offre toutefois des perspectives intéressantes pour la mise en œuvre opérationnelle du cadre réglementaire pour la REUT agricole mais également pour d'autres usages notamment urbains.

Mots clés : Réutilisation des eaux usées, Micro-organismes pathogènes, Risques sanitaires, Approche multi-barrières, Gestion collective, Modélisation d'accompagnement, Simulation participative, QMRA.

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

Abstract

This research focuses on the collective construction of integrated microbiological risk management and the contributions it could make to more sustainable treated wastewater reuse (WR) systems. The quality requirements for managing the microbiological risks associated with reuse are becoming increasingly stringent. Additional treatment processes are often required, threatening the economic balance of projects and raising questions about their environmental impact. However, in its 2006 guidelines, the World Health Organisation encourages risk management that is based not only on treatment, but also on the practices implemented and the equipment used. This approach, known as “multi-barrier”, is more integrated and systemic. It therefore involves a wider range of stakeholders in risk management and calls for the collective construction of management choices.

A participatory simulation tool, called Multiware, has been developed as a result of a companion modelling process carried out with some of the players involved in the Clermont-Ferrand agricultural WR project. It takes the form of a role-playing game that includes various physical supports (board, cards, etc.) as well as a computer model. The aim is for players to create, test and collectively simulate risk management scenarios (advanced treatment, multi-barrier, etc.) and discuss the associated impacts (health, economic or organisational). The computer model includes a risk assessment and management model, which includes a quantitative risk assessment model (QMRA) and a database of possible barrier measures. The tool was used in the case of Clermont-Ferrand to discuss the possible management options and build a risk management plan to comply with the new regulatory framework (decree of 18/12/2023). It was also used for the Porquerolles case study and for an agricultural WR project currently under construction in the Drôme region.

The collective construction of scenarios by the various stakeholders provides the information needed to build microbiological risk management beyond the health aspects: economic considerations, local specificities, organisational issues, societal issues, etc. It also helps to compare perceptions, particularly of the risks associated with WASTE, and to express expectations, needs and individual issues. For example, the collective identification of populations at risk confirmed the findings of the literature on the heterogeneity of perceptions and the need for collective discussion. The process of collective construction of the “conventional” management approach based on meeting quality criteria showed the limitations of this this approach from a health point of view, but also for building sustainable WR systems. By adopting a management approach based on exposure dose rather than concentration in treated wastewater, the non-negligible contribution of the cultivation and irrigation practices implemented and the equipment used beyond treatment in reducing the risks for exposed populations was highlighted. The benefits of more systemic and integrated risk management approach were demonstrated.

However, questions remain about the parameters of the risk assessment and management model incorporated into the tool. In addition, the effects on the participants and the scope of the results produced by the system need to be confirmed by additional workshops. However, the system offers interesting prospects for the operational implementation of the regulatory framework for agricultural WR, and also for the integration of other uses of WR, other risks and other issues.

Key words : Wastewater reuse, Pathogens, Health risks, Multi-barrier approach, Collective management, Companion modelling, participatory simulation, QMRA

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

Remerciements

A Pascal Molle, mon directeur de thèse, et Rémi Lombard-Latune, Rémi Declercq, Emeline Hassenforder mes encadrants pour m'avoir guidée dans ma réflexion et mon apprentissage à travers les différentes disciplines tout en me laissant explorer mon sujet. Un grand merci pour vos relectures, souvent sollicitées à la dernière minute, et vos encouragements.

A Dominique Courault et Nicolas Becu, qui ont gentiment accepté d'être rapporteurs de cette thèse, ainsi qu'aux membres du jury, Rémy Bayard, Camille Arnault et Sonia Grimbühler. Un grand merci d'avoir accepté d'évaluer mes travaux de recherche et pour vos retours qui ont grandement contribué à ma réflexion. Un grand merci à Isabelle Albert, Olivier Barreteau et Sami Bouarfa pour vos contributions lors des comités de thèse et pour les différents moments où vous m'avez accompagnée.

A l'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée Corse, au métaprogramme BETTER et à ECOFILAE pour leur soutien financier, qui m'a permis de mener à bien mes travaux de recherche mais aussi pour les temps d'échanges que nous avons eu.

A Catherine Néel, pour les nombreux moments que nous avons partagés à Clermont-Ferrand. Un grand merci pour ton aide précieuse lors des ateliers et pour tes encouragements lors de la thèse. Un grand merci à tous les acteurs de Clermont-Ferrand, en particulier M.Cautier, M.Sainte Martine et M.Lépine pour tous ces échanges depuis le début de la thèse. Un grand merci également à toutes les autres personnes de Clermont-Ferrand qui ont participé aux entretiens et aux ateliers. Un grand merci également à tous les acteurs des ateliers de Porquerolles et de la Drôme. J'aurais aimé toutes et tous vous citer pour vous remercier de votre temps et de votre implication lors des ateliers parce que sans vous mes travaux n'auraient pas pu avancer. Un grand merci également aux personnes des Journées techniques EPNAC qui ont participé à l'atelier à Angoulême, de même que les personnes de la conférence d'ISAGA à La Rochelle. Un grand merci également à leurs organisateurs et organisatrices de m'avoir permis d'y tester mon outil.

Aux membres du réseau REUSE pour votre intégration dès les premiers mois de la thèse, pour tous ces échanges, vos encouragements et l'intérêt que vous avez porté à mes travaux.

A toutes les autres personnes que j'ai eu la chance de rencontrer pendant ces trois ans.

A toute l'équipe de REVERSAAL pour m'avoir offert un tel cadre pour mener ma thèse. Un grand merci pour toutes ces discussions scientifiques mais aussi non-scientifiques, ces moments sportifs et non-sportifs et surtout vos encouragements jusqu'à la fin ! Ces trois années ont été de belles années et vous y avez très fortement contribué. A mes amis et amies de l'ISTOM, de Granville et d'ailleurs, pour tous les moments qu'on a vécus ensemble et qu'on vivra et pour m'avoir soutenu pendant cette aventure. A Edson et Clémentine, pour votre super accompagnement pendant ce ménisque cassé qui n'a pas été une mince affaire.

A Michaël, Serge et tous les collègues du PEPA pour cette belle expérience malienne qui a grandement contribué à susciter mon intérêt pour la gestion des eaux usées.

Et surtout à ma famille et plus particulièrement à mes parents et ma sœur qui ont été un soutien essentiel pendant ces trois ans qui n'ont pas été de tout repos ! Vous croyez en moi et m'apportez énormément d'amour (et de patience) et pour ça, merci beaucoup.

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

Table des matières

Résumé 9
Abstract 10
Remerciements 11
Table des matières 12
Productions scientifiques 15
Table des figures 16
Table des tableaux 18
Abréviations 19
Introduction générale 21
1 Chapitre 1 - La construction d'un modèle d'évaluation des risques et d'une base de données sur les mesures de gestion envisageables 26
1.1 Des approches de gestion des risques évoluant au fil des connaissances 27
1.1.1 1973 : des premières directives adoptant une approche « qualité unique » basée sur des critères microbiologiques 27
1.1.2 1989 : une première révision envisageant une approche « qualité définie selon l'usage » basée sur des critères épidémiologiques 28
1.1.3 2006 : une deuxième révision intégrant une approche centrée sur la « dose d'exposition » ... 31
1.1.4 En conclusion, une évolution des approches de gestion des risques justifiée par l'évolution des connaissances 36
1.2 Evaluation des risques microbiologiques : construction du modèle QMRA 37
1.2.1 Présentation des méthodologies envisageables pour évaluer les risques 37
1.2.2 Construction d'un modèle QMRA qui soit mobilisable par les acteurs du terrain 41
1.2.3 Etape 1 - Formulation du problème : sélection des micro-organismes pathogènes 42
1.2.4 Etape 2 - Evaluation de l'exposition : construction des scénarios d'exposition 46
1.2.5 Etape 3 – Intégration du modèle dose-réponse : calcul de la probabilité d'infection 57
1.2.6 Etape 4 - Caractérisation des risques 59
1.2.7 En conclusion, la construction d'un modèle générique et simplifié d'évaluation quantitative des risques utilisable par les acteurs du terrain 62
1.3 Réduction des risques : construction d'une base de données sur les mesures de gestion envisageables 63
1.3.1 Construction de la base de données à partir des cadres normatifs 63
1.3.2 Amélioration de la qualité des EUT (Q) 71
1.3.3 Contribution des équipements professionnels (E) 77
1.3.4 Importance des pratiques d'utilisation des EUT et culturales (P) 85
1.3.5 Mesures assurant le fonctionnement du système global et autres mesures (S) 101
1.3.6 Organisation et mise en œuvre des mesures barrières 104

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

1.3.7 En conclusion, un large ensemble de mesures envisageables pour réduire les risques microbiologiques rassemblées dans une base de données et intégrées au modèle 106
1.4 Conclusion du chapitre 1 : la production d'un modèle d'évaluation et de gestion des risques 106
2 Chapitre 2 - La co-construction d'un outil de simulation participative 108
2.1 Mobiliser les approches participatives pour construire collectivement la gestion des risques 109
2.1.1 La participation, un concept dominant dans la gestion des ressources mais encore assez peu mobilisé pour la REUT 109
2.1.2 Construire la gestion des risques dans un contexte de complexité généralisée 116
2.2 Une démarche de modélisation d'accompagnement pour co-construire un outil de simulation participative 126
2.2.1 Un processus de co-construction avec le cas de Clermont-Ferrand 126
2.2.2 La production d'un outil de simulation participative : l'outil Multiware 136
2.3 Utilisation de l'outil sur différents cas de REUT agricole 143
2.3.1 Présentation des deux autres cas d'étude retenus 144
2.3.2 Une adaptation chemin-faisant de l'outil et de la méthodologie de mise en œuvre 146
2.3.3 La mise en place d'un protocole de suivi pour identifier les apports de la construction collective 150
2.4 Conclusion du chapitre 2 : la production d'un outil de simulation participative 154
3 Chapitre 3 - La construction collective de scénarios de gestion des risques microbiologiques pour la REUT agricole 155
3.1 Une mise en lumière des limites d'une gestion basée sur l'ajout de procédés de traitement supplémentaire 156
3.1.1 Un choix à l'échelle collective pour permettre une flexibilité dans les assolements mais dont les coûts suscitent des réactions d'opposition 157
3.1.2 Des configurations individuelles et semi-individuelles envisagées face au blocage de certains joueurs 162
3.1.3 L'intégration de la collectivité dans la prise en charge économique et/ou opérationnelle 163
3.1.4 Conclusion sur les apports de la construction collective du scénario « approche conventionnelle » 166
3.2 L'identification de mesures *barrières* déjà mises en place à travers les équipements utilisés et les pratiques culturales et d'irrigation 167
3.2.1 Des mesures barrières existantes contribuant à empêcher l'exposition des populations (Etape 1) 168
3.2.2 Des mesures barrières existantes contribuant à réduire la dose d'exposition (Etape 2) 172
3.2.3 Un apport d'informations pour définir les mesures barrières supplémentaires (Etape 3) 178
3.2.4 Conclusion sur les apports de la construction collective du scénario « approche multi-barrières » 186
3.3 Une confrontation des représentations sur les risques et l'apport d'une autre approche pour évaluer les risques 186
3.3.1 Une analyse ex ante qui confirme une perception des risques parfois hétérogène et pas toujours prévisible et indiquant un besoin d'informations 187

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

3.3.2 Un partage des représentations à travers la construction des scénarios d'exposition 193
3.3.3 Conclusion sur les apports d'une construction collective des scénarios d'exposition 199
3.4 Une appréhension collective du cadre réglementaire qui produit différents effets sur les participants 200
3.4.1 Différents effets d'apprentissage cognitifs et relationnels 200
3.4.2 Des interrogations sur la portée opérationnelle des résultats et du dispositif 220
3.4.3 La production de données mobilisables pour les cas réels 231
3.4.4 En conclusion 233
4 Discussion générale et conclusion – Apports de la construction collective pour des filières de REUT durables 235
4.1 Des filières de REUT assurant la sécurité sanitaire des populations exposées 237
4.2 Des filières de REUT économiquement soutenable 243
4.3 Des filières de REUT socialement acceptable 244
4.4 Un dispositif qui présente des perspectives intéressantes 248
Annexes 251
Références 267

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

Productions scientifiques

Articles en revue de comité de lecture

Thomas, AR., Declercq, R., Hassenforder, E., Molle, P., Lombard-Latune, R., 2024. L'approche multi-barrière comme gestion alternative des risques pathogènes pour la réutilisation des eaux usées traitées. Techniques Sciences Méthodes, 95–113. https://doi.org/10.36904/20240595

Communications orales

Thomas, AR., Declercq, R., Hassenforder, E., Abrami, G., Molle, P., Lombard-Latune, R. *Applying WHO's Multiple barriers Approach For A Participatory And Integrated Risk Management In The Agricultural Reuse Project Of Clermont-Ferrand (France).* The 13th IWA International Conference on Water Reclamation and Reuse. Water Reuse : Overcoming the Challenges of Growth and Climate Change. 15-19 Janvier 2023, Chennai, Inde.

Thomas, AR. *Gestion intégrée et participative des risques liés aux micro-organismes pathogènes dans les projets de réutilisation des eaux usées*. 102ème Congrès de l'ASTEE. 5-8 Juin 2023. Nice, France.

Thomas, AR., Declercq, R., Hassenforder, E., Abrami, G., Molle, P., Lombard-Latune, R. *Multiware : participatory design of wastewater reuse system based on integrated health risk management.* ISAGA 54th Anniversary Conference. Simulation and Gaming for Social and Environmental Transitions. 4-7 Juillet 2023, La Rochelle, France.

Thomas, AR. *Gestion des risques liés aux pathogènes dans les projets de réutilisation des eaux usées traitées : l'approche "Multi-barrières" comme alternative à l'ajout de traitements poussés*. Journées Techniques EPNAC. 3-4 Octobre 2023. Angoulême, France.

Thomas, AR., Lombard-Latune, R., Molle, P., Declercq, R., Hassenforder, E. *Multiware : un outil de simulation participative pour une gestion collective et intégrée des risques pathogènes dans les cas de réutilisation des eaux usées traitées en irrigation agricole.* Rencontres Jeu & Enjeux. 25-27 Juin 2024, Montpellier, France.

Thomas, AR., Declercq, R., Molle, P., Hassenforder, E., Lombard-Latune, R. *Multiware : a participatory simulation tool for integrated and collective pathogens risk management in agricultural water reuse projects.* REUSE EUROMED 2024 : Euro-Mediterranean Conference on Water Reuse. 29-31 Octobre 2024, Montpellier, France.

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

Table des figures

Figure 1 : Situation concernant les arrêtés sécheresse pour les eaux superficielles au 01/09/2022 (vigiEau.gouv.fr) 22
Figure 2 : Relation pathogène-hôte et les voies de transmission possibles des infections liées aux excréta (IRCWD, 1985) 28
Figure 3 : Modèle proposé par l'OMS illustrant l'effet des différentes mesures de prévention des risques pour la santé (WHO, 1989) 30
Figure 4 : Différentes étapes du processus d'une maladie infectieuse gastro-intestinale (Havelaar &Melse, 2003) 32
Figure 5 : Explication des DALYs (Wikipédia, 2024) 33
Figure 6 : Nombre de citations des directives de l'OMS de 1989 et de 2006 dans les journaux académiques en se basant sur des extractions de la base de données Scopus réalisées le 13/01/2022 (Drechsel et al., 2022) 35
Figure 7 : Présentation des différentes étapes de la QMRA (Petterson, Roser & Deere, 2015 cité par WHO, 2016) 39
Figure 8 : Limites du système pour l'évaluation des risques (Maffettone & Gawlik, 2022) 46
Figure 9 : Différents modèles dose-réponse proposés dans la littérature selon les micro-organismes pathogènes sélectionnés pour la QMRA (Zhiteneva et al., 2020) 57
Figure 10 : Total des DALYs perdus par la population mondiale (tous âges et tous sexes confondus) selon différentes causes pour l'année 2021 (adapté des données de WHO, 2024) 62
Figure 11 : Comparaison de la réduction log et des prescriptions techniques attribuées par les cadres réglementaires pour la mesure « goutte à goutte » 65
Figure 12 : Procédés de traitement mobilisés dans les projets recensés par l'état de lieux de la REUT réalisé en 2022 (Lombard-Latune & Bruyère, 2023) 72
Figure 13 : Réduction logarithmique fixe retenue (log) et coûts d'investissement (€/m^3) et opérationnels (€/m^3) associés pour certains procédés de traitement secondaire et tertiaire 74
Figure 14 : Exemples de signalisation du périmètre irrigué et du réseau de distribution 84
Figure 15 : Temps de survie des différents micro-organismes pathogènes en comparaison avec les périodes de croissance des végétaux dans des climats chauds (IRCWD, 1985) 92
Figure 16 : Les huit échelons de la participation citoyenne (adapté de Arnstein, 1969) 115
Figure 17 : Ensemble de facteurs influençant la perception des risques (ENHANCE, 2016) 118
Figure 18 : Extraits de différents médias français s'intéressant à la REUT 119
Figure 19 : Représentation du processus de modélisation participative (ComMod) 124
Figure 20 : Lagunes de maturation assurant la production des eaux réutilisées par l'ASA LN 127
Figure 21 : Schéma conceptuel réalisé à partir des données obtenues lors de l'atelier « ARDI » 133
Figure 22 : Exemple de mesures barrières identifiées lors de la visite terrain 135
Figure 23: Temps de co-construction et d'utilisation de l'outil de simulation participative 136
Figure 24 : Plateau de Multiware avec les différents éléments symbolisant les rôles (à gauche) et présentation d'un exemple de fiche de rôle attribué à chaque joueur (à droite) (version utilisée à Porquerolles, non définitive) 138
Figure 25 : Exemples de cartes « mesures barrières » pour les différentes catégories et des indications fournies aux joueurs (version utilisée à Clermont-Ferrand, non définitive) 139
Figure 26 : Organisation des différentes étapes de la simulation menant à la production des scénarios ... 140
Figure 27 : Etapes et supports permettant la construction du scénario « multi-barrières » 142
Figure 28 : Fonctionnement du système de Porquerolles (Cerema, 2024) 144
Figure 29 : Méthodes mobilisées pour le suivi-évaluation des trois ateliers 153
Figure 30 : Différentes configurations envisagées pour la répartition des coûts d'investissement (atelier de la Drôme) 160
Figure 31 : Estimation des cotisations après ajout de la filière supplémentaire (atelier de la Drôme) 161

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

Figure 32 : Mise en place de différentes unités de traitement avancés à plusieurs échelles (Porquerolles) 162
Figure 33 : Résultats de la QMRA pour les risques associés à norovirus pour l'atelier de Clermont-Ferrand 173
Figure 34 : Résultats de la QMRA pour les risques associés à norovirus pour l'atelier de Clermont-Ferrand après modification des paramètres 175
Figure 35 : Résultats de la QMRA pour les risques associés à rotavirus pour l'atelier de la Drôme 176
Figure 36 : Résultats de la QMRA pour les risques associés à rotavirus pour l'atelier de Porquerolles (1 et 2) 178
Figure 37 : Mesures de gestion supplémentaires définies pour l'atelier de Clermont-Ferrand 179
Figure 38 : Mesures de gestion supplémentaires définies pour l'atelier de la Drôme 181
Figure 39 : Mesures de gestion supplémentaires définies pour l'atelier de Porquerolles (1 et 2) 184
Figure 40 : Analyse ex ante de la perception des participants des trois ateliers sur la REUT comme étant une pratique pouvant représenter des risques 187
Figure 41 : Tentative de corrélation entre les degrés de connaissances vis-à-vis des risques et des mesures de gestion indiqués par les participants et leur positionnent vis-à-vis de la REUT comme pratique pouvant représenter des risques pour la santé humaine 190
Figure 42 : Positionnement vis-à-vis de différents usages agricoles (Drôme et Porquerolles) 191
Figure 43 : Comparaison entre les réponses associés aux usages agricoles et la perception de la REUT comme une pratique pouvant représenter des usages 192
Figure 44 : Apprentissage indiqué par les participants à l'issu des ateliers 200
Figure 45 : Évolutions des connaissances sur les risques indiquées par les participants entre les évaluations ex ante et ex post 201
Figure 46 : Avis des joueurs sur la contribution de l'atelier à renforcer la confiance dans la REUT 206
Figure 47 : Evolution des connaissances sur les mesures de gestion indiquées par les participants entre les évaluations ex ante et ex post 207
Figure 48 : Avis sur les scénarios produits par les participants de la Drôme et de Porquerolles 209
Figure 49 : Avis ex post sur les mesures proposées par l'outil (Drôme et Porquerolles) 210
Figure 50 : Avis des joueurs de l'atelier de Clermont-Ferrand concernant les scénarios produits 212
Figure 51 : Avis des observateurs de l'atelier de Clermont-Ferrand concernant les scénarios produits 212
Figure 52 : Avis ex ante sur la contribution de l'encadrement par une réglementation pour la gestion des risques liés à la REUT (Drôme et Porquerolles) 216
Figure 53 : Évolution du degré de connaissances sur réglementation indiqué par les participants (Drôme et Porquerolles) 218
Figure 54 : Répartition des joueurs pour les trois ateliers 221
Figure 55 : Positionnement ex ante des participants vis à vis de la REUT pour les ateliers de la Drôme et de Porquerolles 221
Figure 56 : Avis des participants concernant l'atelier de manière générale 226
Figure 57 : Avis des participants sur la contribution de ce genre d'atelier à l'organisation collective et l'implication individuelle 228

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

Table des tableaux

Tableau 1 : Catégories de qualité définies dans la première révision des directives de l'OMS (adapté des données de WHO, 1989) 29
Tableau 2 : Objectifs liés à la santé pour l'utilisation d'eaux usées traitées en agriculture (adapté de WHO, 2006) 34
Tableau 3 : Exemple d'une matrice de risque permettant de réaliser une évaluation semi-quantitative (WHO, 2016 cité par Maffettone and Gawlik, 2022) 38
Tableau 4 : Concentrations retenues dans notre modèle pour les micro-organismes pathogènes sélectionnés 45
Tableau 5 : Paramètres identifiés pour la voie d'exposition « Produit » 50
Tableau 6 : Paramètres retenus pour les voies d'exposition « Sol » et « Plante » 52
Tableau 7 : Paramètres retenus pour les voies d'exposition « Eau » et « Air » 55
Tableau 8 : Modèles dose-réponse et paramètres retenus pour chaque microorganisme pathogène de référence 58
Tableau 9 : Ratio maladie /infection retenus dans le modèle 59
Tableau 10 : DALYs perdus par cas de maladie et fraction de susceptibilité retenus 61
Tableau 11 : Exemples des différences identifiées pour plusieurs mesures concernant leur intégration, la réduction associée ou encore les informations fournies 64
Tableau 12 : Classification des mesures barrières utilisées dans la base de données 66
Tableau 13 : Mesures de gestion retenues dans la base de données, contribution sanitaire et coûts associés 70
Tableau 14 : Procédés de traitement secondaires et tertiaires retenus 72
Tableau 15 : Echelles utilisées dans le modèle pour la mise en place des procédés de traitement 75
Tableau 16 : Combinaisons de procédés tertiaires retenues pour la base de données 75
Tableau 17 : Contributions retenues dans le modèle pour la mesure « micro-aspersion » et « couverture intégrale » 79
Tableau 18 : Contributions retenues pour les mesures « goutte à goutte de surface » et « goutte à goutte enterré » 81
Tableau 19 : Coûts estimés pour les systèmes d'irrigation 82
Tableau 20 : Contributions associées à la mesure « choix des cultures » 87
Tableau 21 : Estimation des coûts associés au suivi microbiologique de routine dans le cas d'une qualité A exigée 103
Tableau 22 : Entités présentes et nombre d'acteurs associés participant aux différents temps de co-construction de l'outil 129
Tableau 23 : Ressources identifiées par les participants lors de l'atelier « ARDI » 131
Tableau 24 : Déroulé de la session d'utilisation de l'outil et éléments abordés pendant chaque phase 140
Tableau 25 Participants présents à l'atelier et distribution des rôles 147
Tableau 26 : Classification des effets d'apprentissage de la simulation participative (adapté de Becu, 2020) 152
Tableau 27 : Exigences de qualité requises et positionnement sur le rôle de distribution pour chaque rôle attribués pour les trois ateliers (Scénario 1) 157
Tableau 28 : Part de la consommation en eau et des cotisations pour chaque joueur, exemple du cas fictif utilisé dans la Drôme 161
Tableau 29 : Mesures barrières déjà mises en place à l'échelle des différents joueurs 168
Tableau 30 : Extraits de réponses apportées par les participants pour répondre à l'affirmation concernant la REUT comme une pratique pouvant présenter des risques pour la santé humaine et animale 189
Tableau 31 : Résultats obtenus lors de l'identification des populations exposées et de l'attribution des voies d'exposition 194
Tableau 32 : Trois niveaux d'utilisation qui pourraient être envisagés pour l'outil MUTLIWARE 248

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

Abréviations

AE LB	Agence de l'Eau Loire-Bretagne
AF	Arrêté français
Anses	Agence Nationale de Sécurité Sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail
ARDI	Acteurs, Ressources, Dynamiques, Interactions
ARS	Agence Régionale de Santé
ASA LN	Association Syndicale Autorisée de la Limagne Noire
ASDFV	Association Sauvegarde des Forêts Varoises
BA	Boues Activées
BP	Beta-Poisson
BRM	Bioréacteur A Membrane
CAM	Clermont-Auvergne-Métropole
CAPEX	Capital Expenditure
CCVD	Communauté de communes du Val de Drôme
Cerema	Centre d'Etudes et d'Expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement
CES	Centre d'Evaluation des Risques
CF	Clermont-Ferrand
CIeau	Centre d'Information sur l'eau
Cl	Chloration
CNRS	Centre National de la Recherche Scientifique
CODERST	Conseil départemental de l'environnement et des risques sanitaires et technologiques
ComMod	Companion Modelling
CSHPF	Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France
CT	Coliformes Totaux
DALYs	Disability-Adjusted Life Years
DDT / DDTM	Direction Départementale des Territoires (DDT) et de la mer (DDTM)
DERU	Directive Eaux Résiduaires Urbaines
DR	Drôme
ENC	Eaux Non Conventionnelles
Eox	Electro-oxydation
EPI	Equipements de Protection Individuelle
EPNAC	Évaluation des procédés nouveaux d'assainissement des petites et moyennes collectivités
EUT	Eaux Usées Traitées
FAO	Food and Agriculture Organisation
FNE-AURA	France Nature Environnement Auvergne Rhône Alpes
FPR	Filtres Plantés de Roseaux
FRANE	Fédération Région AuRA Nature Environnement
FS	Filtre à sable
GC	Génome copie
GES	Gaz à effet de serre
GIEC	Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat
HACCP	*Hazard Analysis and Critical Control Points*
INEC	Institution National d'Economie Circulaire
INRAE	Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'alimentation et l'Environnement
INS	Institutionnel
IRCWD	International Reference Center for Waste Disposal
ISO	International Organisation for Standardisation

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

JRC	Joint Research Center
LM	Lagunage de Maturation
Log	Logarithme
MF	Microfiltration
MTPM	Métropole Toulon Provence Méditerranée
Multiware	Multi-actors, Multi-barriers, Multi-WAter REuse
NRMMC	National Resource Management Ministerial Council
OP	Opérationnel
OPEX	Operating expense
PAT	Projets Alimentaires Territoriaux
PGSSA	Planification de la Sécurité Sanitaire de l'Assainissement
$P_{inf,pppa}$	Probabilité d'infection par personne et par an
$P_{mal,pppa}$	Probabilité de maladie par personne et par an
PNPC	Parc National de Port-Cros
pppa	Par personne et par an
PQ	Porquerolles
QMRA	Quantitative Microbial Risk Assessment
RE	Règlement européen
REUT	Réutilisation des Eaux Usées Traitées
$R_{mal/inf}$	Ratio maladie / infection
SCV	Société civile
SIID	Syndicat d'Irrigation Drômois
STEP	Station d'Epuration
STF	Scientifique
UE	Union Européenne
UF	Ultrafiltration
UFC	Unité Formant Colonies
UN	United Nations
US-EPA	United States Environmental Protection Agency
UV	Ultra-violet
WHO / OMS	World Health Organisation / Organisation Mondiale de la Santé
WWAP	World Water Assessment Programme

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

Introduction générale

Les eaux usées produites par les activités humaines, en particulier domestiques et industrielles, ont longtemps été perçues comme un problème à gérer plutôt qu'une ressource à valoriser. Un changement de paradigme semble néanmoins progressivement s'opérer à l'échelle internationale (Villarin *et al.,* 2020). En 2017, l'UN-Water, qui coordonne les travaux des Nations Unies sur l'eau et l'assainissement, intitule son *Rapport annuel mondial* sur la mise en valeur des ressources en eau : « *Les eaux usées, une ressource inexploitée* » (WWAP, 2017). Leur « réutilisation », généralement après traitement, n'est plus une pratique spécifique aux régions confrontées à de fortes tensions sur la ressource telles qu'Israël, la Californie ou encore l'Australie. Elle s'inscrit de plus en plus dans les stratégies internationales et nationales pour faire face aux pressions liées aux dérèglement climatique et aux activités humaines. Elle est également une réponse aux enjeux associés à la gestion intégrée des ressources en eau (WHO, 2006 ; WWAP, 2017 ; Drechsel, Qadir & Galiboug, 2022).

En effet, la réutilisation des eaux usées traitées (REUT) offre une possibilité de substitution des ressources plus vulnérables ou à haute valeur ajoutée comme les eaux de surface ou les eaux souterraines nécessaires à la production d'eau potable. Elle peut alors être planifiée pour répondre aux besoins de différents usages tels que l'irrigation agricole. L'agriculture est ainsi responsable de 70% des prélèvements d'eau à l'échelle mondiale et des augmentations importantes sont attendues dans les prochaines décennies (WWAP, 2017). Parallèlement, un déficit de 40% des ressources en eau douce est prévu d'ici à 2030 (GCEW, 2023). Dans une logique d'économie circulaire, les eaux usées traitées (EUT) peuvent répondre aux besoins d'apport en eau et également aux besoins de fertilisants (azote, phosphore…) (Jiménez & Asano, 2008 ; WWAP, 2017 ; Mainardis *et al.,* 2022). La production plutôt constante d'eaux usées traitées (EUT) apporte également une sécurisation intéressante des apports ce secteur (Trinh *et al.*, 2013 cité par Dickin *et al.*, 2016) ainsi qu'un soutien à la production alimentaire (Mok *et al.,* 2014). La REUT peut également répondre aux besoins d'autres usages : les usages urbains (arrosages des espaces, nettoyage des voieries ou encore stratégie anti-incendie…), les usages récréatifs (arrosage des golfs, remplissage de plans d'eaux…), les usages industriels (recyclage interne des eaux de process) voir même la production d'eau potable (production directe ou indirecte) dans certains pays (Jiménez & Asano, 2008 ; Carré, 2017 ; Noury, 2021). Des réflexions sur les consommations en eau doivent néanmoins accompagner le développement de cette pratique (CDDAT, 2020). Enfin, c'est également une réponse à certains enjeux environnementaux puisque la REUT peut contribuer à limiter le rejet des stations d'épuration dans des milieux sensibles (Mainardis *et al.,* 2022).

En France, la pratique est encore assez marginale. Un premier panorama réalisé en 2020 par le Cerema faisait état de 58 projets en fonctionnement avec 60 % pour l'irrigation agricole et 26 % pour l'arrosage de golfs. Quelques exemples emblématiques sont généralement cités comme l'irrigation des pommes de terre de Noirmoutier, les vergers de Porquerolles ou encore la plaine de la Limagne à Clermont-Ferrand. La REUT représente environ 8 à 11 million de m^3 sur un volume annuel total d'EUT produit estimé à 8,4 milliard de m^3. Cela correspond à un taux de REUT d'environ 0,5 % (Cerema, 2020). A titre comparatif, certains pays atteignent des taux bien plus élevés : 5% pour l'Italie, 12% pour l'Espagne, 35% pour Singapore et 87% pour Israël (Mekorot, 2017 cité par European Commission, 2018). Ces taux sont néanmoins à mettre en regard des enjeux sur les ressources en eau associés à chaque pays. En effet, les ressources en eau à l'échelle du territoire français étaient jusqu'à présent plutôt abondantes, ce qui est une des explications pour ce faible recours aux EUT (Garin *et al.,* 2021). Une actualisation du panorama réalisée en 2023 indique que le nombre de projets de REUT en fonctionnement semble en progression depuis les cinq dernières années avec treize nouveaux projets entrés en fonctionnement. Bien que la part des usages agricoles dans la REUT soit en baisse, une forte croissance de la REUT pour d'autres usages comme les espaces verts est observée. De nouveaux usages commencent à voir le jour comme l'hydrocurage de réseaux ou le nettoyage de voieries (Lombard-Latune & Bruyère, 2023). Un projet de production indirecte d'eau potable est également mené en Vendée.

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

Les récentes injonctions politiques amorcées par les Assises de l'Eau en 2019 puis affirmées par l'annonce du « Plan Eau » en mars 2023 semblent annoncer un tournant dans la considération de la pratique. La REUT fait partie de ces mesures annoncées par le Plan Eau qui vise « *à redéfinir notre politique de gestion de l'eau pour l'adapter aux enjeux du changement climatique* ». L'objectif est « *d'investir massivement dans la réutilisation des eaux usées* » et plus largement dans la réutilisation des eaux « non conventionnelles » (ENC) qui englobent les EUT mais également d'autres ressources comme les eaux de pluie ou les eaux pluviales. Plusieurs chiffres sont annoncés : créer 1 000 projets de réutilisation d'ici 2027 et atteindre 10% de volume d'eaux usées traitées d'ici 2030 (Gouvernement français, 2023a). Si ces chiffres sont questionnables, une forte attente est toutefois exprimée vis-à-vis de la pratique.

La France fait en effet face depuis ces dernières années à des épisodes de déficits pluviométriques hivernaux et de sécheresses estivales importants et répétés. L'année 2022 a été marquée par une sécheresse historique qui a menacé des usages prioritaires comme la production d'eau potable. La mise en place de mesures de restrictions de l'usage de l'eau a été nécessaire (Figure 1).

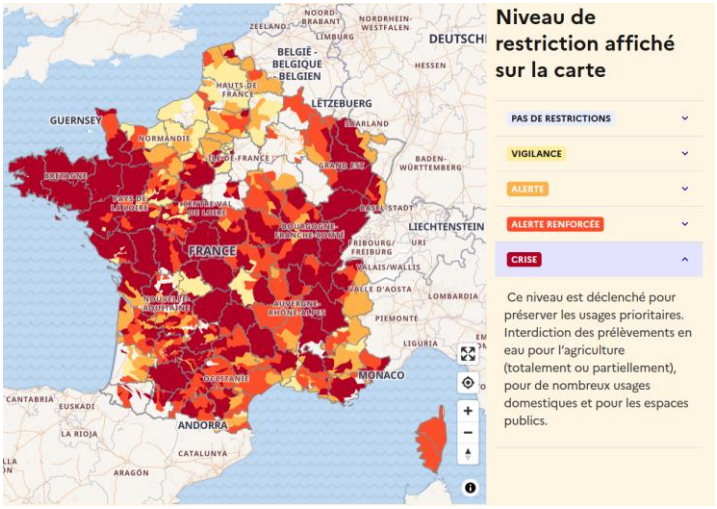


Figure 1 : Situation concernant les arrêtés sécheresse pour les eaux superficielles au 01/09/2022 (vigiEau.gouv.fr)

Or ces sécheresses s'accompagnent généralement d'une hausse des besoins d'irrigation liées aux fortes températures. Des situations de conflit sont ainsi apparues pour répondre aux différents besoins. Ces situations sont amenées à se multiplier dans les années à venir (CCDAT, 2020). La REUT émerge ainsi dans le débat public comme une des réponses à ces tensions (Garin *et al.*, 2021). En parallèle de cet engouement politique, un certain engouement médiatique mais aussi opérationnel est observé vis-à-vis de la REUT. Néanmoins, en parallèle de cet engouement, d'importants changements réglementaires ont récemment eu lieu. Ces changements ont amené certaines incertitudes concernant les perspectives de la REUT (Lombard-Latune & Bruyère, 2023).

En effet, le premier règlement européen (RE) relatif à la réutilisation des eaux usées traitées pour l'irrigation agricole est entré en vigueur en 2020 (2020/741). Un des objectifs de cette réglementation est d'encourager le développement, encore timide, de la REUT à l'échelle de l'Union Européenne (UE). En 2015, le volume de REUT était ainsi estimé à 2,4% du volume total d'EUT produits au niveau des pays de l'UE (European Commission, 2018). Avec l'accroissement des pressions quantitatives mais aussi qualitatives sur les ressources en eau, la REUT est indiquée comme une des solutions pour répondre à ces pressions. Néanmoins, le manque d'harmonisation des exigences réglementaires, en particulier microbiologiques, à l'échelle des différents pays a été identifié comme un de freins au développement de la pratique (EC, 2018). Les exigences plus ou moins strictes selon les pays entraînent également une différence de compétitivité entre les produits, impactant le bon fonctionnement du marché intérieur des produits agricoles (Alcalde-Sanz & Gawlik, 2017; Fawell *et al.,* 2016 cité par Mclennan *et al.,* 2023). L'objectif de ce règlement commun est donc d'harmoniser les exigences et d'établir un cadre commun entre les pays de l'UE.

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

L'entrée en application en juin 2023 du RE 2020/741 a nécessité des modifications du cadre réglementaire français qui était en vigueur. Ainsi, l'arrêté du 02/08/2010 qui encadrait jusqu'à présent la REUT pour l'irrigation agricole et l'arrosage des espaces verts en France a été abrogé. Il a été remplacé par deux arrêtés : l'arrêté du 18/12/2023 pour l'irrigation agricole et l'arrêté du 14/12/2023 pour l'arrosage d'espaces verts. Comme dans l'arrêté du 02/08/2010, quatre classes de qualité d'eau sont définies dans le RE 2020/741. Chaque classe correspond à une concentration en *Escherichia coli*, un indicateur de contamination fécale, à atteindre dans les EUT. Différents usages agricoles sont autorisés selon la classe atteinte. Les concentrations en *E.coli* exigées pour chaque classe (A à D) sont schématiquement 100 fois plus faibles dans le RE 2020/741 que ce qui était requis dans l'arrêté de 2010. Une classe A dans l'arrêté de 2010 (≤ 250 UFC/100mL) correspond désormais à une classe B dans le RE 2020/741 et dans l'arrêté du 18/12/2023 (≤ 100 UFC/100mL). La parution du RE 2020/741 s'est donc traduite par un renforcement des exigences de qualité des EUT, en particulier pour la classe A. Cette classe concerne notamment les cultures alimentaires consommées crues.

Pour atteindre ces niveaux de qualité très stricts, des procédés de traitement avancé devront être mis en place. Ces procédés nécessitent généralement des compétences techniques et génèrent des coûts d'investissements et opérationnels supplémentaires qui seront à répartir (Mclennan *et al.,* 2024). La mise en conformité des projets vis-à-vis de la nouvelle réglementation peut alors soulever des préoccupations, en particulier pour les petites collectivités aux moyens plus limités qui rassemblent la majorité des cas de REUT agricole en France (Lombard-Latune & Bruyère, 2023). De manière générale, les coûts d'investissements et de fonctionnement associés à la pratique sont indiqués comme un des freins actuels au développement de la pratique (Lombard-Latune & Bruyère, 2023 ; Locqueville, 2023). Ce renforcement des exigences semble donc en contradiction avec les objectifs de massification annoncés par le Plan Eau. Le bilan environnemental associé aux renforcements des exigences de qualité est également à questionner. En effet, selon Alix *et al.* (2022), les émissions des services d'eau et d'assainissement représentent entre 3 et 7% des émissions de gaz à effets de serre des villes. La littérature interpelle de plus en plus sur la prise en compte des impacts environnementaux associés aux procédés de traitement avancé, des impacts qui sont néanmoins encore souvent négligés (de Boer *et al.,* 2022).

Une autre approche est également envisagée par le RE 2020/741. Des EUT de qualité inférieure à celle normalement requise pour l'usage désiré peuvent être utilisées à condition que des mesures « barrières » soient appliquées au-delà du traitement. Par exemple, cela peut être l'utilisation de systèmes d'irrigation localisés, la préparation post-récolte des produits finaux ou encore l'interruption ou l'arrêt de l'irrigation avant la récolte pour favoriser l'inactivation naturelle des micro-organismes pathogènes... Cette approche fait référence à l'approche « multi-barrières » conceptualisée par l'Organisation mondiale de la Santé (OMS) dans la dernière édition de ses *Directives sur l'utilisation sans risque des eaux usées, des excréta et des eaux ménagères* (WHO, 2006). Dans ses directives, l'OMS propose un changement de paradigme : celui de dépasser une gestion centrée sur le traitement pour une gestion sur l'ensemble de la filière. Elle va même plus loin que les réglementations européennes et françaises en s'affranchissant entièrement des objectifs de qualité pour des objectifs basés sur la santé des populations exposées. Cette approche encourage donc une gestion plus intégrée et systémique des risques (NRMMC *et al.,* 2006). Elle nécessite l'implication d'un plus large panel d'acteurs dans la gestion des risques et notamment les agriculteurs que ce soit pour la construction des choix de gestion que de la mise en œuvre. Une discussion avec l'ensemble des acteurs concernés est donc encouragée (Maffettone & Gawlik, 2022). Néanmoins, les acteurs mobilisés par la REUT n'ont pas nécessairement l'habitude de travailler ensemble (ARPE, 2017 ; Noury, 2021). Cela suscite donc des interrogations sur l'organisation de cette approche et sa mise en œuvre. Néanmoins, la mise en place de mesures *barrières* permettrait de s'affranchir de la mise en place de procédés de traitement très poussés (WHO, 2006) et donc des impacts associés que nous avons mentionnés précédemment. Elle pourrait contribuer à la construction de filières de REUT qui soient plus durables.

Mes travaux de recherche s'intéressent donc aux apports d'une construction collective de la gestion des risques microbiologiques pour des filières de REUT durables. Pour accompagner cette construction collective, je propose de mobiliser les approches participatives et notamment la simulation participative. En effet, les

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

dispositifs participatifs sont largement encouragés pour favoriser la collaboration des parties prenantes et leur engagement et la création d'espaces de discussion qui vont au-delà de la simple consultation ou de l'information pour une prise de décisions partagées par l'ensemble des acteurs concernés (Basco-Carrera *et al.,* 2017 ; van Buuren *et al.,* 2019 ; Becu, 2020). Les approches de simulation participative mobilisant l'ensemble des parties prenantes sont particulièrement intéressantes pour intégrer des connaissances expertes et non-expertes de différentes disciplines dans la décision, faire émerger des connaissances ou encore produire des changements transformationnels (van Bruggen *et al.,* 2017 cité par Becu, 2020). Les approches participatives sont de plus en plus plébiscitées pour les projets REUT (Goodwin *et al.,* 2019a ; Noury, 2021 ; Maffettone & Gawlik, 2022). Néanmoins, elles restent encore peu mobilisées.

Mes travaux de thèse présentent donc différents intérêts. Tout d'abord, je m'intéresse à l'approche *multi-barrières,* une approche qui suscite de l'intérêt mais aussi des interrogations chez les acteurs du terrain, en particulier depuis la parution du RE 2020/741. Je propose également de suivre les recommandations des directives de l'OMS de 2006 et de dépasser les critères de qualité pour une évaluation des risques à travers le prisme de la dose d'exposition. Ainsi, je mobilise la *Quantitative Microbial Risk Assessment* (QMRA), une méthodologie d'évaluation des risques qui permet d'estimer les effets sur la santé associés à une exposition aux EUT. Au-delà de cette méthodologie, j'aborde les risques sanitaires associés aux microorganismes pathogènes à travers une approche interdisciplinaire, qui s'appuie sur différentes disciplines pour rassembler les connaissances nécessaires à l'évaluation et la gestion des risques (sanitaire, économique, technique…). A travers la mobilisation des approches participatives, je propose également l'inclusion de contributeurs non académiques dans le processus de production de connaissances et propose donc une approche transdisciplinaire (Lawrence *et al.,* 2022 ; Etienne, 2023). Cette tentative d'aborder le sujet de manière exhaustive, par différents angles et en intégrant plusieurs disciplines, a limité une approche approfondie de chaque discipline, ce qui peut en faire sa faiblesse. Cette thèse présente néanmoins une première tentative d'une construction collective de la gestion des risques pour la REUT. Bien qu'imparfaite, cette tentative a permis de mettre en lumière le besoin d'un partage d'informations scientifiques et opérationnelles pour construire la gestion ainsi que le besoin d'une confrontation des représentations. Elle propose également une analyse de l'approche « multi-barrières » dans un contexte de pays du Nord, dont les études proviennent jusqu'à présent plutôt des pays du sud.

Les recherches ont été limitées aux usages agricoles car le temps de la thèse n'a pas été suffisant pour aborder d'autres usages comme les usages urbains malgré les intérêts qu'ils suscitent. Les usages agricoles ont été privilégiés car ils sont encadrés par le RE 2020/741 et que ces usages sont les plus développés en France actuellement (Lombard-Latune & Bruyère, 2023). Les recherches se sont également concentrées sur les risques associés aux micro-organismes pathogènes puisque les seuils de qualité sont définis à travers ces risques dans les cadres réglementaires européens et français actuels. Néanmoins, les résultats produits offrent des perspectives intéressantes pour aborder d'autres usages et d'autres risques sanitaires, voire environnementaux.

Dans un premier chapitre, je m'intéresse aux différentes approches proposées par la réglementation (atteinte de la qualité requise, *multi-barrières*…) pour tenter de comprendre leurs fondements et également les raisons qui ont amené l'OMS à s'affranchir des critères de qualité et à encourager cette approche *multi-barrières*. Je montrerai que les avancées des connaissances microbiologiques, épidémiologiques et de la modélisation des risques y ont fortement contribué. Ensuite, j'aborderai la QMRA, une méthodologie d'évaluation des risques qui est encouragée par l'OMS et de plus en plus mobilisée dans la littérature scientifique pour la REUT. Cette méthodologie présente différents intérêts par rapport aux autres méthodologies et notamment ceux d'être plus précise et plus objective et de permettre la construction de la gestion sur les risques effectifs et non potentiels. Elle est néanmoins plus complexe dans son utilisation. L'objectif était donc de développer un modèle générique et simple d'utilisation, qui permettrait aux acteurs d'aborder des notions clés associés aux risques et de les accompagner dans la construction de leur scénario de gestion. Ensuite, je présenterai la base de données qui a été constituée et qui rassemble un ensemble de mesures envisageables pour réduire les risques microbiologiques. Elle a été construite à partir des directives

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

de l'OMS de 2006 mais aussi d'autres cadres normatifs. La construction de cette base de données m'a permis de rassembler les informations fournies par les cadres normatifs et de les analyser. Cette analyse a montré certaines limites et a mis en lumière différents besoins concernant les mesures *barrières* proposées. Des recherches bibliographiques et un travail avec le bureau d'étude ECOFILAE m'ont permis de compléter, dans une certaine mesure, ces informations. Une catégorisation des mesures barrières a ainsi été réalisée ainsi qu'une spécification des contributions sanitaires et une caractérisation de certains coûts économiques.

Dans un deuxième chapitre, je m'intéresse au concept de la participation, aux différentes approches participatives qui peuvent être envisagées et aux degrés de participation associés. Ces approches sont fortement encouragées pour la REUT, en particulier pour des objectifs d'information et de consultation des parties prenantes. Or la littérature indique l'importance d'aller à des degrés plus élevés de participation et notamment d'une collaboration entre les différentes parties prenantes pour construire la gestion. La littérature indique également que la perception des risques est un facteur d'influence déterminant dans les choix de gestion. Cette perception repose sur un certain nombre de facteurs subjectifs, qui dépasse l'apport de connaissances factuelles et qui complexifie la gestion des risques. Ainsi, nous verrons comment les outils de simulation participative semblent être une méthodologie intéressante pour répondre aux enjeux de partage des représentations et d'accompagnement des acteurs des systèmes complexes. Au-delà de l'intégration des parties prenantes dans la simulation, leur intégration dans la construction de leur outil de simulation participative présente également de nombreux intérêts pour encourager la compréhension des systèmes complexes, la collaboration entre les acteurs et le partage de connaissances. Une démarche de modélisation d'accompagnement a donc été mise en place avec une partie des acteurs du cas emblématique de Clermont-Ferrand. Elle a contribué à produire l'outil « Multiware », un outil de simulation participative qui permet aux acteurs de créer, tester et simuler des scénarios de gestion des risques. Cet outil sera présenté ainsi que les différents cas d'étude où il a été utilisé : avec le comité de suivi du cas de Clermont-Ferrand, avec différents acteurs d'un autre cas emblématique de la REUT agricole qui est le cas de Porquerolles ainsi qu'avec le comité de pilotage d'un projet en construction dans la Drôme. Je terminerai ce chapitre par les adaptations de l'outil et de l'organisation de la session que ces différentes sessions de simulation ont nécessité ainsi que par le protocole de suivi évaluation qui a été mis en place pour évaluer les apports de la construction collective de la gestion des risques pour les trois ateliers.

Le troisième et dernier chapitre sera consacré aux résultats issus des trois ateliers où l'outil a été utilisé. Nous verrons dans un premier temps que les processus de construction des différents scénarios de gestion ont suscité un ensemble de discussions entre les participants sur les choix et leurs impacts qui ont confirmé l'intérêt d'une construction collective rassemblant différentes parties prenantes. Les limites associées à une gestion des risques basée sur l'ajout de procédés de traitement supplémentaire a été mis en lumière ainsi qu'une remise en question des critères de qualité. Le processus de construction du deuxième scénario, consacré à l'approche *multi-barrières* a montré la contribution non-négligeable des équipements utilisés et des pratiques culturales et d'irrigation dans la réduction des risques. Des informations concernant les mesures *barrières* envisageables ont été produites indiquant l'intérêt de mobiliser les différents acteurs de la filière et notamment les agriculteurs. Ensuite, nous verrons que l'évaluation collective des risques a montré un besoin de partager les représentations parfois hétérogènes des risques. Enfin, je m'intéresserai à la portée de l'outil de simulation participative. Je montrerai qu'il contribue à accompagner la construction collective et à opérationnaliser le cadre réglementaire. Néanmoins, les discussions suscitées par la mise en discussion n'ont pas pu être abouties et ont laissé un ensemble de questionnements en suspens qui interrogent sur la portée opérationnelle des résultats produits.

Enfin, je terminerai par une discussion générale et une conclusion sur les résultats et les apports d'une construction collective pour des filières de REUT durables.

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

1 Chapitre 1 - La construction d'un modèle d'évaluation des risques et d'une base de données sur les mesures de gestion envisageables

Comme indiqué en introduction, deux approches de gestion des risques sont envisagées par le règlement européen (RE) 2020/741 et l'arrêté français (AF) du 18/12/2023. La première consiste à atteindre des niveaux de qualité des EUT, souvent très stricts, qui sont définis selon les usages. Ces niveaux peuvent être atteints grâce à la mise en place de procédés de traitement avancé. La deuxième approche consiste à gérer les risques grâce à la mise en place des mesures *barrières* au-delà du traitement. Cette possibilité fait écho à l'approche *multi-barrières* conceptualisée par l'OMS dans la troisième édition de ses directives sur l'utilisation des eaux usées (WHO, 2006).

Ce premier chapitre est consacré aux notions associées à la gestion des risques microbiologiques, aux éléments clés et aux méthodologies. Dans une première partie, nous nous intéresserons aux différentes approches de gestion envisagées par les cadres normatifs. L'objectif est de comprendre leurs fondements scientifiques à partir desquels elles ont été construites ainsi que les concepts qui les caractérisent. Ces approches sont étudiées à travers les évolutions des directives de l'OMS qui ont successivement adopté ces différentes approches. Nous verrons les raisons qui ont amené l'OMS à s'affranchir des objectifs de qualité et dépasser une gestion basée uniquement sur le traitement pour une gestion basée sur des objectifs liés à la santé et la mise en place de mesures *barrières* tout au long de la filière. Nous verrons que pour vérifier l'atteinte de ces objectifs et choisir la combinaison des mesures barrières à mettre en place, l'OMS propose l'utilisation de la *Quantitative Microbial Risk Assessment* (QMRA), une méthodologie d'évaluation des risques utilisant des modèles mathématiques et intégrant notamment des données épidémiologiques.

Ainsi, dans une deuxième partie, nous verrons que la QMRA fait partie des méthodologies envisageables pour évaluer les risques. En comparaison aux autres méthodologies, la QMRA est plus complexe et nécessite un ensemble de données important pour sa réalisation. Néanmoins, elle est reconnue comme plus précise et plus objective (WHO, 2016a). Elle permet d'aborder les risques à travers la notion de « dose d'exposition », ce qui renforce son intérêt. Elle est également de plus en plus utilisée dans la littérature scientifique pour évaluer les risques associés à la REUT (Zhiteneva *et al*., 2020) mais aussi pour construire les cadres réglementaires (NRMMC *et al.,* 2006 ; Bichai & Smeets, 2013). Ainsi, cette méthodologie a été retenue pour construire la gestion des risques. Un modèle générique et simplifié de QMRA a donc été construit en se basant sur les indications des directives de l'OMS (WHO, 2006) et des directives australiennes (NRMMC *et al.,* 2006) mais aussi sur le choix des pairs indiqués dans la littérature. Après avoir décrit les principes clés de la QMRA, nous présenterons donc le modèle : les paramètres retenus pour chacune des quatre étapes qui composent la QMRA, les raisons justifiant nos choix mais aussi les questionnements associés à ces choix, ainsi que les productions attendues. Ces éléments sont essentiels à connaître pour l'interprétation des sorties du modèle. Des pistes pour une montée en complexité du modèle ont également été identifiées et sont présentées en parallèle des choix effectués pour cette première version.

L'évaluation des risques grâce au modèle QMRA permet ensuite de définir les mesures de gestion à mettre en place. La troisième et dernière partie est consacrée à la construction d'une base de données rassemblant les mesures *barrières* envisageables pour gérer les risques. Nous analysons tout d'abord les mesures indiquées par les cadres normatifs, les informations fournies et tentons d'identifier les références scientifiques qui ont contribué à la validation de ces mesures. Des limites et des besoins ont été identifiés auxquels nous avons, en partie, répondu en proposant une nouvelle classification mais aussi à travers la caractérisation des impacts sanitaires et des impacts économiques.

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

1.1 Des approches de gestion des risques évoluant au fil des connaissances

La réutilisation des eaux usées pour l'irrigation agricole n'est pas une pratique nouvelle. Les preuves de l'utilisation des eaux usées pour l'irrigation et la fertilisation agricoles remontent jusqu'aux temps préhistoriques (Angelakis *et al.*, 2018). L'encadrement de la pratique est néanmoins plus récent. La première réglementation a été établie en Californie en 1918. Compte tenu des tensions sur les ressources en eau à l'échelle de cet Etat, la REUT est rapidement parue comme une nécessité pour compléter ces ressources et aussi fournir des alternatives à l'évacuation des effluents dans les eaux de surface. Cette première réglementation encadre alors l'utilisation des eaux usées pour un usage agricole. L'utilisation d'eaux usées non traitées est interdite pour les cultures consommées crues. Elle est néanmoins autorisée pour les cultures consommées cuites et les cultures non alimentaires sous condition de l'attente d'une période de 30 jours ou plus avant la récolte. Des éléments qui font écho à l'approche *multi-barrières* comme nous le verrons ultérieurement. La réglementation californienne a ensuite évolué avec les nouvelles connaissances ainsi qu'avec le développement des technologies de traitement (NRC, 1996). Elle se base désormais sur l'approche appelée « *One-size-fits-all* » (European Commission, 2018) ou « qualité unique ». Ainsi, pour l'irrigation agricole, la qualité requise est identique pour l'ensemble des cultures (< 2,2 Coliformes totaux /100mL) (U.S. EPA, 2012).

Depuis la parution de la première réglementation de 1918, d'autres pays ont établi leur cadre normatif en particulier après la parution en 1973 des premières directives de l'OMS sur l'utilisation des eaux usées. L'OMS y adopte une approche « qualité unique » (WHO, 1973). En 1989, l'OMS revoit ses directives et adopte une approche « *Fit-for-purpose* » (European Commission, 2018), ou « qualité selon l'usage ». Plusieurs classes de qualité sont définies selon les usages et les populations exposées (WHO, 1989). Une approche qui sera reprise pour la construction de nombreux cadres normatifs dont l'AF du 02/08/2010 et le RE 2020/741. En 2006, une deuxième révision est engagée. Les objectifs de qualité sont remplacés par des objectifs liés à la santé atteignables grâce à la mise en place de mesures de protection sur l'ensemble de la filière. Cette approche propose donc une gestion basée sur la « dose d'exposition » plutôt que sur la concentration dans l'eau (WHO, 2006). Nous verrons que les révisions des directives ont été influencées par différents éléments dont les évolutions des connaissances scientifiques. Ces éléments seront le sujet des prochaines sections.

1.1.1 1973 : des premières directives adoptant une approche « qualité unique » basée sur des critères microbiologiques

Le début du 20ème siècle a été marqué par le développement des villes, l'industrialisation et l'accroissement démographique. Ces évolutions ont conduit à l'augmentation des besoins en eau mais aussi à la pollution de la ressource. En 1971, l'OMS publie la troisième édition des « *International standards for drinking-water* ». Au-delà des enjeux associés à la production d'eau potable, les experts soulignent l'importance de mener des recherches sur la réutilisation des eaux usées. Ils encouragent le développement des méthodes de traitement pour réduire la pollution des ressources, tout en encourageant l'augmentation des ressources en eau disponibles et donc l'utilisation des eaux usées traitées. Ainsi, la première édition des directives est publiée en 1973 (WHO, 1973).

Pour établir ses directives, l'OMS se base sur différents éléments. Tout d'abord, elle mobilise les résultats de différentes études scientifiques sur la réutilisation des eaux usées. Par exemple, une étude en Israël montre que l'utilisation des eaux usées brutes pour l'irrigation de cultures agricoles a probablement été à l'origine de l'épidémie de choléra survenue en 1970 à Jérusalem. Une autre étude, menée en Inde, a monté que les infections entériques étaient plus fréquentes chez les travailleurs agricoles travaillant sur les fermes d'épandage des eaux usées, comparé aux travailleurs agricoles en général. Pour l'OMS, il est donc important que ces directives permettent la protection des consommateurs mais également des travailleurs au contact

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

des eaux usées. L'OMS invite donc dès ses premières directives à considérer la protection de l'ensemble des populations exposées au-delà du consommateur.

L'OMS se base également sur les cadres normatifs existants tels que la réglementation californienne de 1918, mentionnée précédemment. L'OMS reconnait qu'une restriction de l'utilisation des eaux usées à certaines cultures, comme les cultures cuites ou non alimentaires, aurait des conséquences économiques importantes pour les agriculteurs. Ainsi, un objectif de concentration en coliformes fécaux (CF), un indicateur bactérien de contamination fécale, est proposé : < 100 pour 100mL. L'OMS justifie cet objectif en indiquant qu'il peut être atteint grâce un bassin de stabilisation biologique suivi par une désinfection poussée par chloration, une filière de traitement relativement courante. L'OMS reconnait néanmoins que ce niveau est strict et qu'il présente des limites puisque nécessitant la mise en place de procédés de traitement avancé. L'OMS maintient ce critère en considérant que les bénéfices liés à l'utilisation des eaux usées contribueront à payer la filière de traitement. Une autre limite associée à ce critère est qu'il repose sur un indicateur bactérien. Des interrogations sont soulevées à l'époque concernant la gestion des entérovirus. Néanmoins, les avancées microbiologiques de l'époque ne permettent pas d'y répondre (WHO, 1973). Ainsi, les limites associées à la représentativité des indicateurs bactériens de contamination fécale étaient déjà indiquées.

Des critères sont également proposés pour les usages récréationnels, industriels, urbains et pour la production d'eau potable. Il est intéressant de voir que, dès les années 1970, l'OMS envisageait tout un panel d'usages pour la réutilisation des eaux usées, au-delà de l'irrigation agricole ou de l'arrosage des espaces verts qui étaient jusqu'à présent les seuls usages autorisés en France.

1.1.2 1989 : une première révision envisageant une approche « qualité définie selon l'usage » basée sur des critères épidémiologiques

En 1982, un projet est mené par l'*International Reference Center for Waste Disposal* (IRCWD) en collaboration avec l'OMS pour évaluer les risques « réels » liés à l'utilisation des excréta humains plutôt que les risques « théoriques » ou « potentiels ». Ce rapport n'inclue pas l'utilisation des eaux usées mais il est reconnu que les risques associés à l'utilisation des excréta et à celle des eaux usées sont de même nature. A l'issue de ce projet, le rapport d'Engelberg est publié (IRCWD, 1985). Ce rapport souligne l'importance de prendre en considération différents éléments dans la gestion des risques tels que :

- Les voies de transmissions entre les populations exposées ;
- Les voies de transmission ;
- Les caractéristiques des micro-organismes pathogènes (persistance dans l'environnement, dose infectieuse…) ;
- Les facteurs de l'hôte (immunité, âge, état de santé…) ;
- Les conditions environnementales (saison…) … (Figure 2).

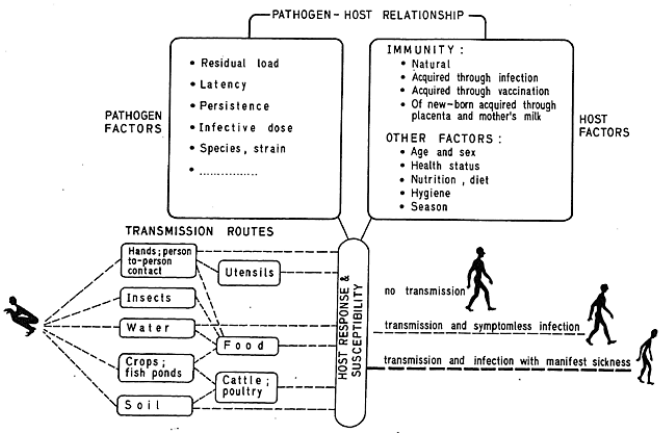


Figure 2 : Relation pathogène-hôte et les voies de transmission possibles des infections liées aux excréta (IRCWD, 1985)

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

Par exemple, selon les caractéristiques des pathogènes, les conditions environnementales peuvent avoir une forte incidence sur leur survie dans l'environnement. Un temps de dépérissement naturel des micro-organismes peut être observé au champ. Ce dépérissement peut être massif en particulier dans des milieux secs et où la température est élevée. Il est donc important de considérer la période où est intégré la phase d'irrigation dans le cycle cultural.

Des études épidémiologiques menées à cette époque indiquent que les risques d'infection sont liés en particulier aux œufs d'helminthes. En effet, certains micro-organismes pathogènes sont plus résistants et ont des temps de survie plus élevé comme par exemple, les œufs de *Taenia saginata* qui peuvent persister jusqu'à plusieurs mois (Feachem *et al.,* 1983). Ces résultats indiquent un besoin d'intégrer ces micro-organismes dans les critères de qualité. Depuis l'identification du choléra fin XIX^{ème} et l'association de sa transmission avec les voies hydriques, l'épidémiologie est considérée comme un domaine important pour étudier la transmission des maladies infectieuses et le rôle de l'environnement (Haas *et al.,* 2014). Les études épidémiologiques montrent donc leur intérêt pour construire la gestion des risques associés à la réutilisation des eaux usées au-delà des études microbiologiques.

En conclusion de leur rapport, les auteurs proposent une révision des directives de l'OMS de 1973 pour prendre en considération ces avancées (IRCWD, 1985).

- **Révision des directives de 1973**

Le rapport d'Engelberg amène l'OMS à reconnaître qu'un « *risque potentiel peut ne jamais devenir effectif* » et que cela dépend de plusieurs conditions :

1. *soit* une dose infectieuse de l'agent pathogène parvient dans le sol ou dans l'eau, *soit* l'agent pathogène se multiplie dans le sol ou dans l'eau pour constituer une dose infectieuse ;
2. La dose infectieuse atteint un hôte humain ;
3. L'hôte est infecté ; et
4. L'infection provoque une maladie ou se transmet » (WHO, 1989).

Si les quatre conditions ne sont pas remplies, alors le risque est seulement potentiel.

L'OMS reconnaît que les normes bactériologiques proposées dans les directives de 1973 sont difficilement applicables et trop restrictives par rapport aux risques effectifs associés à l'utilisation des eaux usées. Les connaissances limitées de l'époque avaient justifié des recommandations prudentes qui ne sont plus justifiées compte tenu de l'avancée des recherches et des résultats des études épidémiologiques. La gestion des risques se base désormais sur cette dose infectieuse, qui parvient dans l'environnement (sol, eau, …) et qui est transmise par une voie d'exposition.

L'OMS adopte donc une approche intégrée avec des critères « *non plus microbiologiques mais épidémiologiques* ». Les études épidémiologiques ont également monté l'importance de considérer d'autres populations exposées comme les personnes circulant ou vivant à proximité des périmètres irrigués. Des catégories de qualité sont donc définies en fonction des usages mais aussi des groupes exposés (Tableau 1).

Catégorie	Conditions	Groupe exposé	Nématodes intestinaux (nombre d'œufs/L)	Coliformes intestinaux (nombre /100mL)
A	Cultures consommées crues, terrains de sport, jardins publics	Ouvriers agricoles, consommateurs, publics	≤1	≤ 1,000
B	Cultures céréalières, industrielles et fourragères, pâturages, plantations d'arbres	Ouvriers agricoles	≤1	-
C	Cultures de la catégorie B si les ouvriers agricoles et le public ne sont pas exposés	-	-	-

Tableau 1 : Catégories de qualité définies dans la première révision des directives de l'OMS (adapté des données de WHO, 1989)

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

Comme indiqué dans le Tableau 1 présenté précédemment, l'OMS revoit ses objectifs de qualité. A la même époque, certains cadres normatifs en vigueur imposaient des critères de qualité très stricts pour une irrigation sans restriction : 2,2 coliformes totaux (CT) /100mL pour la Californie, 12 CF/100mL dans 80% des échantillons et 2,2 CF dans 50% des échantillons pour Israël (Paranychianakis *et al.,* 2015 ; Angelakis *et al.* 2018). L'objectif pour l'OMS est de proposer des critères de qualité qui soient applicables et cohérents vis à vis des risques effectifs. Le niveau de qualité requis pour la catégorie A se base sur des études propres à la REUT mais aussi sur les qualités des eaux de rivière et les normes relatives à la qualité des eaux de baignade de l'époque (≤ 10,000 coliformes totaux indiqué par la Commission économique européenne par exemple). Les experts avaient conclu à l'époque « *qu'il ne serait pas raisonnable ni rationnel de retenir les directives antérieures relatives à l'irrigation qui étaient voisines à des directives concernant l'eau de boisson alors que les autorités sanitaires estimaient que la concentration en coliformes intestinaux pouvait être de 1,000 ou plus dans les eaux usées de rivière utilisées pour l'irrigation et dans les eaux de baignade* » (WHO, 1989). La comparaison des exigences de qualité imposées à la REUT et celles imposées, ou non, à d'autres usages telles que l'irrigation avec des eaux de surface ou la baignade est un élément sur lequel nous reviendrons dans le chapitre 3.

L'absence de critères pour les virus dans les directives de 1989 peut être critiquée en regard des données dont nous disposons actuellement ainsi que l'absence de critères concernant les bactéries en catégorie B. Néanmoins, cette révision des directives a permis d'introduire des éléments clés comme les différentes populations exposées, la distinction des types de micro-organismes pathogènes (bactéries, helminthes…) ou encore l'adaptation de la qualité en fonction des usages.

Un autre changement majeur est l'introduction de la possibilité de mettre des mesures barrières en cas de traitement partiel des eaux usées (Figure 3).

Fig. 5. Modèle généralisé illustrant l'effet de différentes mesures de prévention des risques pour la santé liés à la réutilisation des eaux usées

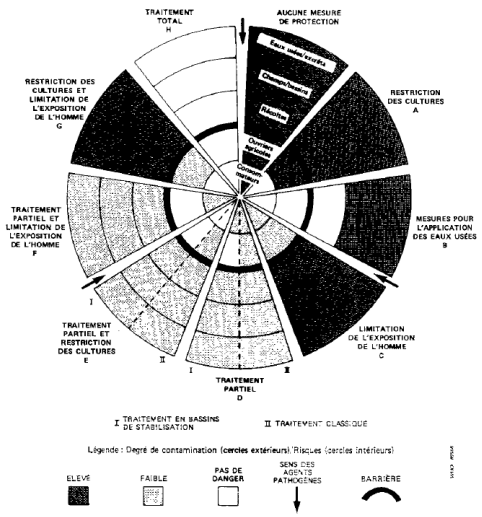


Figure 3 : Modèle proposé par l'OMS illustrant l'effet des différentes mesures de prévention des risques pour la santé (WHO, 1989)

Par exemple, la restriction des cultures peut contribuer à limiter l'exposition du consommateur. Les ouvriers agricoles sont néanmoins exposés (A, Figure 3). Des mesures de limitation de l'exposition telles que le port d'équipements de protection peuvent alors être appliquées (G, Figure 3). Des mesures pour l'application des eaux usées comme l'utilisation des systèmes d'irrigation localisés peuvent contribuer à limiter l'exposition des ouvriers agricoles mais aussi des consommateurs (B, Figure 3). D'autres mesures peuvent également être envisagées telles que les préparations post-récolte des produits (lavage, cuisson, pelage…) ou la mise en place de distance par rapport au périmètre irrigué.

L'OMS encourage ainsi une approche systémique, adaptée aux conditions locales et progressive où la priorité est mise sur l'amélioration de l'existant (WHO, 1989). Certaines de ces mesures sont parfois déjà imposées

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

dans certains cadres normatifs. L'OMS indique l'exemple du Koweit où des restrictions sur les cultures sont imposées et où les ouvriers agricoles doivent porter des vêtements de protection et passer régulièrement une visite médicale (WHO, 1989).

Les directives de 1989 vont influencer la construction de nombreux cadres normatifs comme nous allons le voir dans le prochain paragraphe.

- **Influence de ces directives pour la construction des cadres normatifs**

Les années 80 et 90 sont marquées par l'émergence d'un certain nombre de cadres normatifs concernant la REUT à travers le monde (Angelakis *et al.,* 2018 ; Noury, 2021). En effet, l'utilisation de ressources en « alternatives » s'inscrit alors dans de plus en plus d'objectifs nationaux et internationaux. De nombreux facteurs encouragent en effet le développement de la pratique : structuration du secteur de l'assainissement et donc développement des préoccupations liées à la gestion des eaux usées, accès de plus en plus difficile à des eaux conventionnelles de qualité, augmentation du stress hydrique à l'échelle planétaire, conflits d'usages, problème d'accès à la ressource mais aussi émergence de considérations écologiques telle que l'économie circulaire… Au-delà des motivations climatiques et politiques, les directives internationales de l'OMS (1989) et de la FAO (1985) inspirent de nombreux pays pour établir leur cadre réglementaire (Angelakis *et al.* 2018 ; Shoushtarian & Negahban-Azar*,* 2020).

En France, cela conduit le Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France (CSHPF) à produire les premières recommandations relatives à la REUT pour l'irrigation des cultures et l'arrosage des espaces verts (circulaires n°51 du 22/07/1991 et du 3 août 1992 du Ministère de la santé) (Cerema, 2020). Ces circulaires reprennent les mêmes classes (A,B,C) et les mêmes niveau d'exigences microbiologiques qu'indiquées par l'OMS.

1.1.3 2006 : une deuxième révision intégrant une approche centrée sur la « dose d'exposition »

- **Avancées des connaissances scientifiques et des méthodes d'évaluation des risques**

Les avancées scientifiques sur les micro-organismes pathogènes, les risques chimiques et la modélisation des risques mais aussi l'évolution dans les caractéristiques des populations et des pratiques nécessitent une nouvelle actualisation des directives de l'OMS au début des années 2000 (WHO, 2006).

Le rapport de Stockholm, publié à la suite d'une réunion d'experts en 1999, est un changement de paradigme dans la gestion des risques pour la réutilisation des eaux usées. Les experts reconnaissent que « *Des normes trop strictes peuvent ne pas être applicables sur la durée et paradoxalement conduire à une moindre protection sanitaire car elles risquent d'être considérées comme impossibles à atteindre dans les conditions locales et donc d'être ignorées »* (WHO, 2006). Ils proposent alors un cadre harmonisé pour l'élaboration des normes et des standards pour les risques microbiologiques qui se basent non plus sur la qualité de l'eau mais sur les données sanitaires de la population donnée. Cette nouvelle approche se veut plus flexible et tente ainsi d'harmoniser les cadres réglementaires entre les pays mais aussi entre les usages, qui sont marqués par une grande hétérogénéité en terme d'indicateurs, de niveaux à atteindre …Elle se veut également une réponse aux limites reconnues de la gestion des risques par des critères de qualité. Ces critères étaient basés sur les bactéries alors que les virus et les protozoaires présentent des risques sanitaires importants et que leur résistance aux traitements et leur devenir dans l'environnement sont très différents. De plus, les risques étaient identifiés lorsque la contamination de l'eau avait eu lieu et donc après l'exposition des populations ce qui présente des limites en terme de gestion (WHO, 2016a). L'objectif était donc de permettre une gestion plus systémique et proactive (NRMMC *et al.,* 2006). L'OMS reconnait également que les effets préjudiciables pour la santé liés à la réutilisation des eaux usées doivent être pesés en regard des bénéfices qu'elle peut engendrer : sécurité alimentaire pour les populations, revenus pour les agriculteurs, bénéfices sanitaires et environnementaux … Néanmoins, « *il ne s'agit pas d'un simple arbitrage. Quelle que soit la contribution de*

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

l'utilisation des eaux usées en agriculture à la sécurité alimentaire et à l'état nutritionnel, il importe d'identifier les dangers qui lui sont associés » (WHO, 2006).

A la fin des années 90, des méthodes d'évaluation des risques se développent et en particulier la *Quantitative Microbial Risk Assessment (QMRA)* qui permet de faire le lien entre la dose d'exposition et les effets sur la santé. En effet, au-delà de la probabilité qu'un risque *potentiel* devienne *effectif* comme indiqué dans les directives de 1989, il existe également une probabilité qu'une exposition entraine un effet sur la santé. En effet, l'exposition à une dose de micro-organismes pathogènes a une probabilité d'entraîner une infection. Cette infection a elle-même une probabilité d'entrainer différents symptômes, et eux-mêmes ont une probabilité d'entrainer une guérison, des symptômes résiduels voir la mort (Figure 4) (Havelaar & Melse, 2003)

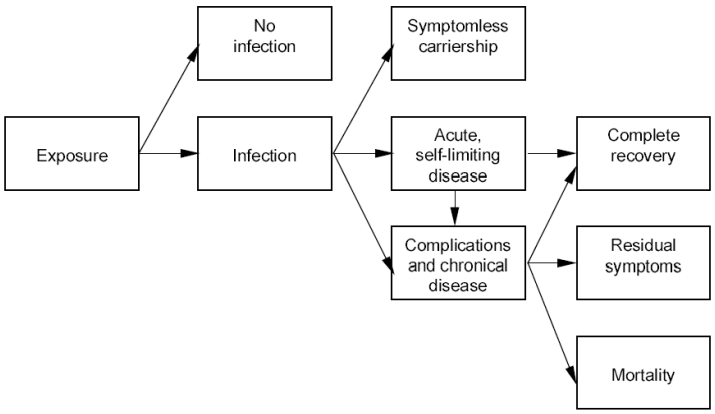


Figure 4 : Différentes étapes du processus d'une maladie infectieuse gastro-intestinale (Havelaar &Melse, 2003)

Ces probabilités dépendent de plusieurs facteurs : i) du microorganisme pathogène considéré, ii) de ses caractéristiques telles que son caractère infectieux, les effets sur la santé qu'il provoque ou encore sa susceptibilité c'est-à-dire sa capacité à passer les barrières de l'hôte, iii) les caractéristiques de l'hôte telles que son état immunitaire, son âge, ses conditions de vie, et iv) la dose d'exposition qui correspond à une certain dose en micro-organismes pathogènes contenue dans un volume auquel l'hôte est exposé (WHO, 2016a).

La QMRA est une approche mathématique qui permet de calculer ces probabilités d'infection ou de maladie associées à l'exposition à une dose spécifique d'un microorganisme pathogène (Zhiteneva *et al.,* 2020). Pour cela, elle se base sur des modèles « *dose-réponse* » qui décrivent la relation entre l'exposition à un microorganisme pathogène (dose) et la probabilité d'infection ou de maladie (réponse). Ces modèles sont établis à partir d'études expérimentales ou de données épidémiologiques. Ils sont spécifiques à chaque microorganisme pathogène (WHO, 2016a). Nous allons voir dans les prochains paragraphes que cette méthodologie a amené à dépasser une gestion des risques basées sur la concentration dans l'eau.

- **L'émergence d'une nouvelle approche en Australie**

L'exemple de l'Australie est intéressant à présenter. Il montre qu'au-delà des connaissances scientifiques, d'autres facteurs influencent l'élaboration des cadres réglementaires et notamment les fortes tensions sur les ressources en eau. De plus, les directives australiennes auront également un impact sur la deuxième révision des directives de l'OMS.

Dès le début des années 90, ce pays se dote d'agences de protection de l'environnement et impose des normes sévères vis-à-vis des rejets des stations d'épuration. Améliorer les procédés de traitement des eaux usées n'étant pas toujours faisable d'un point de vue technique ou économique, les responsables doivent donc trouver des solutions alternatives. Elles se tournent alors vers la REUT. En 1992, la *National Water Quality Management Strategy* est adoptée pour encourager une meilleure gestion des ressources en eau et

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

sert de guide national pour la gestion de la qualité de l'eau (et notamment de la réutilisation). De ces orientations générales, les différents Etats établissent leur propre réglementation (Radcliffe & Declan, 2020). Au début des années 2000, l'Australie est particulièrement touchée par d'importantes sécheresses qui accélèrent fortement le recours à la pratique. Les Etats sont alors encouragés à adopter différentes réformes pour la gestion des ressources et au développement de la réutilisation des eaux usées. Des premières directives nationales sont publiées en 2006 pour orienter ces réformes. Différents éléments y sont intégrés comme les risques sanitaires majeurs mais aussi la prise en compte des externalités positives sociales et environnementales, l'utilisation de données scientifiques fondées, l'encouragement des meilleures pratiques et l'intégration des citoyens aux décisions (NRMMC *et al.* 2006 ; Radcliffe & Declan, 2020). Ces directives sont orientées autour de la gestion du risque sanitaire et environnemental selon l'approche développée dans les directives pour l'eau potable nationale et de l'OMS. L'objectif est de proposer une gestion du risque qui soit applicable à tous les systèmes de réutilisation, quelques soient les usages (agricole, urbain…), leur taille et leur complexité. La QMRA est alors introduite ainsi qu'une gestion des risques sur l'ensemble de la filière inspirée des approches *Hazard Analysis and Critical Control Points* (HACCP) utilisées pour la production d'eau potable et alimentaire. Un plan de gestion des risques est proposé pour encourager pour une gestion plus proactive (NRMMC *et al.*, 2006).

- **Révision des directives de 1989**

Une troisième révision des directives est donc publiée par l'OMS en 2006. Les objectifs pour la gestion des risques ne sont plus des objectifs de qualité définis par l'éventuelle présence de micro-organismes pathogènes mais par des objectifs liés à la santé pour les populations potentiellement exposées. L'OMS indique ainsi une perte tolérable ≤ 10^{-6} DALYs (« *Disability-Adjusted Life Years* ») par personne et par an ($DALYs_{pppa}$) quel que soit le microorganisme considéré. Le DALYs (ou « Espérance de vie corrigée de l'incapacité » en français), est une unité de mesure internationale qui représente le nombre d'années de vie perdues en bonne santé lié à la maladie (*Years Lived with Disability, YLD)* ou à l'incapacité provoquée par la maladie ou au décès précoce (*Years of Life Lost, YLL)* (Figure 5). Cette unité est utilisée pour évaluer les conséquences sanitaires de causes diverses comme les maladies (respiratoires, digestives, cardiovasculaires…) et les blessures liées aux accidents de la route, aux catastrophes naturelles, aux conflits etc… Pour les risques associés aux micro-organismes pathogènes, les DALYs perdus par cas de maladie pour chaque pathogène sont calculés en considérant la gravité et la durée associées aux différents effets de la maladie (Havelaar & Melse, 2003). Un exemple de calcul des DALYs pour rotavirus est présenté en Annexe 1 (p.251).

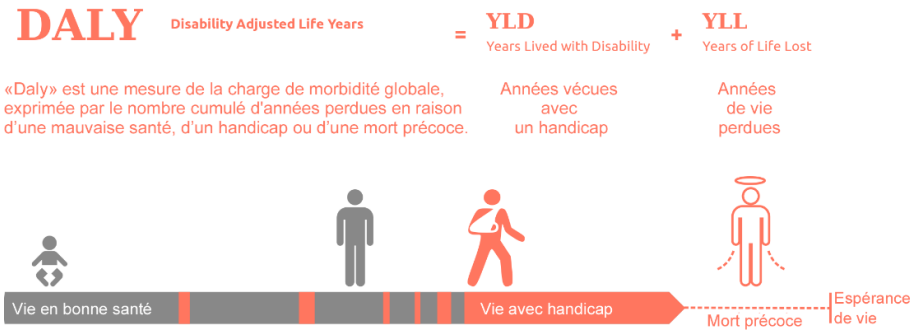


Figure 5 : Explication des DALYs (Wikipédia, 2024)

Cet objectif est le même que celui pour l'eau potable (WHO, 2022). En effet, l'OMS indique que les consommateurs s'attendent à ce que leur nourriture soit aussi sécurisée que leur eau potable (Mara & Sleigh, 2010). Cet objectif provient de celui qui avait été fixé pour les produits chimiques cancérogènes. Il correspond approximativement à un excès de risque de cancer sur une vie de 10^{-5}, soit « *un excédent de 1 cas de cancer pour 100 000 personnes consommant quotidiennement de l'eau de boisson répondant à l'objectif en terme*

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

de qualité pendant une période de 70 ans » (OMS, 2017). La charge de morbidité associée correspond à environ 1 x 10^{-6} $DALYs_{pppa}$. Ce niveau de charge peut être comparé à celui produit par une diarrhée « *spontanément résolutive* », c'est à dire qui se guérit d'elle-même, due à une infection par un microorganisme pathogène. Cette maladie bénigne (taux de mortalité d'environ 10^{-5}) mais plus fréquente (risque annuel de 1 pour 1000) correspond à une charge de morbidité d'environ $1x10^{-6}$ $DALYs_{pppa}$. Sur une population de 1 million de personnes, la perte cumulée représente au total une année de vie perdue ou vécue avec une incapacité pour l'ensemble de la population par an.

Pour calculer les $DALYs_{pppa}$, il est nécessaire d'utiliser la QMRA. Cette méthodologie sera présentée en détail dans la prochaine partie. Si le $DALYs_{pppa}$ calculé dépasse l'objectif de l'OMS, des mesures de protection doivent être mises en place pour réduire les risques. Comme mentionné en début de ce chapitre, la QMRA nécessite un ensemble de données qui ne sont pas toujours disponibles et qui sont complexes à mobiliser. L'OMS traduit donc cet objectif lié à la santé par des objectifs de réduction à atteindre, exprimés en unité logarithmique (log). Ainsi, pour atteindre l'objectif de 10^{-6} $DALYs_{pppa}$, une réduction totale de 6-7 log a été définie pour assurer une gestion suffisante des risques pour les consommateurs en cas d'irrigation sans restriction sur les cultures (Tableau 2).

Scénario d'exposition	Log_{10} de la réduction des agents pathogènes nécessaires	Nombre d'œufs d'helminthes par litre
Irrigation sans restriction		
Laitues	6	≤1
Oignons	7	≤1
Irrigation restreinte		
Agriculture fortement mécanisée	3	≤1
Agriculture à forte intensité de main d'œuvre	4	≤1
Irrigation localisée		
Cultures de grande hauteur	2	Pas de recommandation
Cultures de faible hauteur	4	≤1

Tableau 2 : Objectifs liés à la santé pour l'utilisation d'eaux usées traitées en agriculture (adapté de WHO, 2006)

Ces objectifs ont été calculés grâce à la QMRA en se basant sur les risques associés à rotavirus. Ainsi, pour le rotavirus, le risque d'infection tolérable pppa est estimé à 10^{-3}. En supposant i) une concentration initiale en rotavirus de 5 000 rotavirus/litre d'eaux usées non traitées ii) un volume résiduel de 10 mL sur 100 gr de laitue après l'irrigation et iii) une consommation de 100 gr de laitue par personne tous les deux jours sur l'ensemble de l'année, une réduction de 6 log est nécessaire pour atteindre un objectif de 10^{-6} $DALYs_{pppa}$. L'ensemble des calculs associé à cet objectif est présenté en Annexe 2 p.252. Ces objectifs varient en fonction des cultures irriguées, des populations exposées ou encore des équipements utilisés. Dans le cas de l'oignon, l'objectif de réduction log à atteindre est plus élevé (7 log). Selon l'OMS, le dépérissement est plus lent dans le sol que sur les surfaces des cultures exposées. Un plus grand nombre de micro-organismes est donc retrouvé à la surface des oignons nécessitant ainsi une réduction log plus élevée (WHO, 2006).

Les directives australiennes proposent également des objectifs de réduction log à atteindre (NRMMC *et al.,* 2006). Contrairement aux directives de l'OMS, les objectifs sont spécifiés pour les différents types de micro-organismes pathogènes. Ainsi, les objectifs de réduction à atteindre sont 6 log pour rotavirus et 5 log pour campylobacter et cryptosporidium pour l'irrigation des cultures vivrières. Ces réductions peuvent être atteintes par différentes combinaison de filière de traitement et/ou de mesures *barrières* selon les cultures irriguées. Ces objectifs ont également été définis grâce à la QMRA. Cependant, les paramètres utilisés pour la QMRA varient entre les directives australiennes (2006) et celles de l'OMS (2006) ce qui explique ces différences entre les objectifs de réduction. Cela indique i) l'intérêt de spécifier selon les types de micro-organismes pathogènes puisque les objectifs peuvent être différents mais aussi ii) l'influence des paramètres

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

d'exposition dans la définition des objectifs à atteindre. Nous aborderons plus en détail ces éléments lors de la prochaine partie.

La réduction de la concentration en micro-organismes dans l'eau n'est donc plus un élément central dans les directives de 2006 de l'OMS. Elle s'intègre dans un ensemble de mesures qui permettent d'atteindre cette dose tolérable d'exposition et donc les objectifs liés à la santé. Ces mesures comprennent les pratiques agricoles (systèmes d'irrigation, distances…) mais aussi les conditions environnementales et les caractéristiques des micro-organismes pathogènes (dépérissement au champ) et les pratiques post-récolte (lavage, séchage…). Le concept d'une gestion par « *barrières multiples* » ou « *multi-barrières* » est alors introduit.

L'OMS encourage l'utilisation de nombreuses ressources pour adapter les objectifs liés à la santé et les objectifs de réduction : les analyses microbiologiques, la QMRA mais aussi des études épidémiologiques. Lorsque cela est possible, les objectifs de santé sont à établir selon une évaluation des risques sanitaires et doivent prendre en considération le contexte « *du niveau de morbidité global dans une population donnée* » c'est-à-dire la prévalence des maladies. D'autres éléments sont essentiels comme le contexte social, environnemental, culturel ou encore économique. Les impacts sur la santé sont à adapter en regard des bénéfices sanitaires et environnementaux apportés.

Ces directives suscitent un intérêt grandissant depuis la dernière décennie dans le milieu académique (Figure 6).

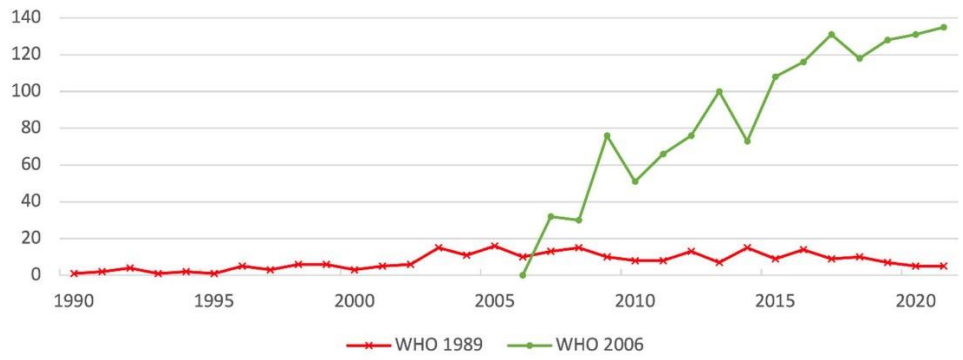


Figure 6 : Nombre de citations des directives de l'OMS de 1989 et de 2006 dans les journaux académiques en se basant sur des extractions de la base de données Scopus réalisées le 13/01/2022 (Drechsel et al., 2022)

Au-delà de l'intérêt suscité dans le milieu académique, les directives de 2006 orientent de nombreux cadres nationaux (Shoushtarian & Negahban-Azar, 2020). Ainsi, l'arrêté du 02/08/2010, qui encadrait jusqu'à présent la pratique en France, intègre des contraintes d'usage qui permettent de se satisfaire d'une qualité inférieure à celle normalement requise. Ces contraintes s'apparentent aux mesures *barrières* proposées par l'OMS puisqu'elles comprennent l'irrigation localisée, l'attente d'un délai après l'irrigation ou encore la transformation. L'intégration de cette approche dans la norme ISO 16075-2 (2020) puis dans le RE 2020/741 et l'AF du 18/12/2023 est encore plus poussée. Les mesures *barrières* envisagées sont plus nombreuses et applicables sur un plus large ensemble des cultures bien que les types d'usage sont moins détaillés. Néanmoins, l'affranchissement des critères de qualité tel le propose l'OMS pour une approche basée sur des objectifs de santé et l'utilisation de la QMRA n'est pas envisagée. Comme indiqué en introduction, les critères de qualité ont même été renforcés.

Comme dans les directives de l'OMS (2006), une réduction en unités log est attribuée pour les différentes mesures ainsi qu'un nombre d'« *équivalents barrières* ». Par exemple, la désinfection des produits avant leur vente aux consommateurs apporte une réduction de 2 log et correspond à 1 *équivalents barrières.* Ainsi, un nombre d'*équivalents barrières* à mettre en place est défini selon la qualité qui est atteinte en sortie de la filière de traitement. Cette méthodologie soulève différents questionnements. Par exemple, l'inactivation naturelle favorisée par l'arrêt ou l'interruption de l'irrigation avant la récolte contribue à une réduction de

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

0,5 à 2 log par jour ce qui est considéré comme un à deux *équivalents barrières.* Cela semble réduire la contribution de cette mesure puisque l'attente de 4 jours pourrait contribuer à une réduction entre 2 à 8 log en suivant la relation mathématique indiquée. Cela pourrait donc éventuellement correspondre à trois *équivalents barrières* comme indiqué pour la réduction de 6 log apportée par l'irrigation souterraine. La méthodologie utilisée pour attribuer le nombre d'*équivalents barrières* n'a pas été identifiée. Elle ne semble pas correspondre aux log associées puisque la bâche résistante aux UV (2 à 4 log) correspond à un *équivalents barrières* tandis que l'irrigation le séchage des cultures fourragères au soleil (2 à 4 log) correspond à deux *équivalents barrières.* Cela soulève donc des interrogations quant à ses fondements de cette méthodologie et à la pertinence de la combinaison choisie. Des acteurs du terrain se sont également interrogés sur cette méthodologie lors de la consultation sur le « Projet d'arrêté relatif aux conditions de production et d'utilisation des eaux usées traitées pour l'irrigation de cultures » et le « Projet d'arrêté relatif aux conditions de production et d'utilisation des eaux usées traitées pour l'arrosage d'espaces verts » qui a eu lieu du 07/06/2023 au 28/06/2023 :

> *« Le nombre d'équivalents barrière (tableau 3) n'est pas clair dans le cas de l'inactivation naturelle favorisée par l'arrêt ou l'interruption de l'irrigation avant récolte (1 à 2 selon la durée de l'interruption). Sur quelles bases scientifiques ce nombre d'équivalent barrières a-t-il été déterminé ? » (CTIFL[1])*

> *« Il est actuellement difficile de comprendre comment un "équivalent barrière" est concrètement défini en relation avec la réduction des agents pathogènes, d'autant plus que cela semble varier en fonction de l'application, qu'elle soit dans un espace public ouvert ou restreint. La corrélation entre un abattement de 1 log et 1 ou 2 équivalents barrières n'est pas clairement établie. Ce tableau, dans son état actuel, nécessite une plus grande précision et des exemples pratiques pour éliminer toute confusion. Il serait utile d'apporter plus de précision à ce tableau avec des exemples concrets pour faciliter la compréhension » (ADEPALE[2])*

Bien que cette méthodologie soit indiquée par l'AF du 18/12/2023 pour sélectionner les mesures *barrières*, les éléments mentionnés précédemment ainsi que les recommandations de l'OMS nous ont amené à mobiliser la QMRA pour construire la gestion des risques. Ce sera le sujet de notre prochaine partie.

1.1.4 En conclusion, une évolution des approches de gestion des risques justifiée par l'évolution des connaissances

L'étude des évolutions des directives de l'OMS sur la réutilisation des eaux usées nous a permis de mieux comprendre les fondements des différentes approches de gestion des risques envisageables et en particulier ceux de l'approche *multi-barrières*. Cette analyse montre l'importance des connaissances microbiologiques pour construire la gestion mais aussi leurs limites. L'intégration d'autres connaissances est également importante notamment celles des études épidémiologiques. L'OMS invite à établir des objectifs de gestion des risques qui soient réalistes par rapport aux conditions locales, basés sur les risques effectifs et non potentiels et qui considèrent des dimensions sanitaires mais aussi économiques, sociales et environnementales. Les avancées issues de la modélisation des risques offrent des perspectives intéressantes pour intégrer des données épidémiologiques mais aussi pour gérer les risques sanitaires de manière plus proactive, systémique et adaptée aux conditions du terrain. Cette partie a également confirmé l'intérêt de considérer les paramètres d'exposition dans l'évaluation des risques plutôt que se baser uniquement sur la concentration dans l'eau. Cette vision de la gestion des risques reste encore peu mobilisée, bien que certains aspects soient néanmoins intégrés dans de nombreux cadres normatifs comme la considération des cultures irriguées, leur destination ou encore les méthodes d'irrigation.

[1] *Centre Technique Interprofessionnel des Fruits et Légumes*
[2] *Association des Entreprises de Produits Alimentaires Élaborés, devenue Pact'Alim en 2024*

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

1.2 Evaluation des risques microbiologiques : construction du modèle QMRA

Quelques soient les objectifs fixés (objectifs de qualité, d'*équivalents barrières*, de réduction log ou encore liés à la santé…), les mesures à mettre en place doivent assurer une protection suffisante de l'ensemble des populations exposées. Ainsi, le RE 2020/741 exige qu'une évaluation des risques soit être faite pour identifier, analyser et évaluer les dangers potentiels. Cette évaluation fournit des informations essentielles pour définir la gestion à mettre en place. Ainsi, l'AF du 28/07/22 relatif au dossier de demande d'autorisation d'utilisation des EUT impose « *l'identification des populations susceptibles d'être exposées aux eaux usées traitées, l'estimation du nombre de personnes concernées et des voies d'exposition; »* et *« l'identification et l'analyse des dangers auxquels l'environnement et les populations sont susceptibles d'être exposés, la caractérisation des situations d'exposition et l'identification des évènements dangereux ».* Néanmoins, aucune méthodologie n'est proposée pour réaliser cette identification ni la caractérisation des situations d'exposition. Les informations fournies par le RE 2020/741 sont plus précises : « *L'évaluation des risques peut être réalisée selon une méthode qualitative ou semi-quantitative. On opte pour une évaluation quantitative* (nb : QMRA) *des risques lorsqu'il existe suffisamment de données le justifiant ou dans le cas de projets susceptibles de comporter des risques élevés pour l'environnement ou la santé publique* ». Plusieurs méthodologies sont donc envisageables pour évaluer les risques. Chacune présente des intérêts et des limites que nous allons aborder dans une première section. Nous verrons ainsi les raisons qui nous ont amené à mobiliser la QMRA dans le cadre de notre recherche. Les paramètres retenus pour chacune des étapes qui composent la QMRA seront présentés dans les sections suivantes. Cela nous a permis de produire un modèle d'évaluation des risques qui sera donc le sujet de cette deuxième partie.

1.2.1 Présentation des méthodologies envisageables pour évaluer les risques

La fin du XX^{ème} siècle est marquée par l'émergence des méthodes d'évaluation des risques. Elle est impulsée notamment par les différentes catastrophes industrielles et scandales sanitaires en lien avec les activités humaines qui ont eu lieu pendant ce siècle : fuite de gaz toxiques d'une usine de pesticides à Bhopal (1984), explosion d'un des réacteurs de la centrale nucléaire de Tchernobyl (1986)… L'objectif est donc de pouvoir mieux anticiper ces conséquences et gérer les controverses sociales qui résultent vis-à-vis des innovations technologiques. Le *Red Book* du National Research Council (NRC) (1983) propose ainsi une méthodologie d'évaluation comparative des risques pour aider à la gestion des controverses liées aux radiations nucléaires et aux produits chimiques cancérigènes. Le NRC contribuera également à la légitimité des méthodes intégrant les calculs dose-réponse et des mesures de l'exposition réelle des populations à ces doses. Il proposera aussi le principe d'une « *gestion des risques fondée sur l'évaluation des risques mais proportionnée aux valeurs politiques, à la faisabilité de la mise en œuvre des décisions ainsi qu'aux coûts et bénéfices économiques de ces dernières* ». Les choix des paramètres sont présentés de manière transparente et sont expliqués en amont de l'évaluation. Une évaluation des incertitudes scientifiques est également réalisée (Demortain, 2019).

L'analyse des risques est devenue essentielle pour la prise de décision, minimiser les impacts ou encore anticiper et réduire la probabilité de leur occurrence. Elle est composée de trois éléments principaux : l'évaluation des risques, la gestion des risques et la communication sur les risques (Haas *et al.,* 2014). Ce schéma évaluation/gestion des risques est mobilisé dans de nombreux secteurs comme l'industrie, la production d'eau potable avec les « *Water Safety Plans* », la production alimentaire avec le « *Codex Alimentarius* » ou encore pour la REUT avec les « *Sanitation Safety Plans* » (WHO, 2016b). Dans cette partie, nous allons nous intéresser en particulier à la première composante qui est l'évaluation des risques.

L'évaluation des risques sanitaires permet ainsi i) d'identifier les risques associés à un système (dangers, évènements dangereux, défaillances…), ii) de les évaluer, iii) de déterminer s'ils sont suffisamment maîtrisés grâce aux mesures mises en place puis, à partir des résultats obtenus, de iv) mettre en place des

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

améliorations ou ajouter des mesures si nécessaire et v) communiquer et informer. Plusieurs méthodes sont proposées pour évaluer les risques liés à la REUT et vont donc être présentées dans cette section.

1.2.1.1 Evaluation qualitatives et semi-quantitatives

Les évaluations qualitatives attribuent des niveaux de probabilité et de conséquences aux dangers et/ou évènements dangereux identifiés. En se basant sur la combinaison de différents niveaux de probabilités (de « rare » à « presque certain ») et de conséquences (de « insignifiante » à « catastrophique »), le niveau ou degré de risque est alors estimé et exprimé par des qualitatifs (par exemple : « très faibles, faibles, modérés, élevés et très élevés »). La méthode semi-quantitative nécessite une approche plus rigoureuse puisque des valeurs numériques sont associées à la probabilité d'occurrence/fréquence et à la sévérité/conséquences pour attribuer des scores aux risques ou aux évènements dangereux, qui sont ensuite hiérarchisés (Tableau 3) (Maffettone & Gawlik, 2022).

LIKELIHOOD	**SEVERITY**				
	Insignificant – 1	**Minor – 2**	**Moderate – 4**	**Major – 8**	**Catastrophic – 16**
Rare (very unlikely) – 1	1	2	4	8	16
Unlikely – 2	2	4	8	16	32
Possible – 3	3	6	12	24	48
Likely – 4	4	8	16	32	64
Almost certain – 5	5	10	20	40	80
Risk Score R = L x S	<6	7-12		13-32	>32
Risk level	Low Risk	Medium Risk		High Risk	Very High Risk

Tableau 3 : Exemple d'une matrice de risque permettant de réaliser une évaluation semi-quantitative (WHO, 2016 cité par Maffettone and Gawlik, 2022)

Cette méthodologie a été utilisée pour différentes études liées à la REUT (Damaceno *et al.*, 2022) et un modèle a été proposé par Rebelo *et al.* (2020). Selon l'OMS, ces méthodologies sont plus faciles à mobiliser mais elles reposent sur des jugements d'experts pour attribuer évaluer les risques. Elles sont donc considérées comme plus subjectives. De plus, elles sont limitées dans la considération des différents micro-organismes pathogènes et de leurs caractéristiques propres en particulier concernant leurs effets sur la santé. L'intégration des différentes connaissances scientifiques est donc plus limitée (WHO, 2016a).

1.2.1.2 Evaluation quantitative des risques

Comme présenté dans la partie 1, la QMRA a été développée dans les années 90. Son cadre méthodologique trouve ses origines dans celui développé pour les risques chimiques associés à la pollution de l'environnement (publié en 1983 dans le *Red Book* du NRC) (Haas *et al.,* 2014). L'objectif de la QMRA est de pouvoir évaluer les risques associés à l'exposition aux micro-organismes pathogènes. Elle est composée de quatre étapes principales (Figure 7):

1. Formulation du problème : sélection des micro-organismes pathogènes de référence à intégrer dans l'étude ;
2. Paramètres d'exposition : identification de l'exposition de la fréquence (généralement en jours par an) et de la dose d'exposition (volume d'exposition et concentration en micro-organismes) pour chaque microorganisme de référence, selon les voies d'exposition et les évènements considérés ainsi que les populations exposées ;
3. Modèle dose-réponse : sélection du modèle dose-réponse pour chaque microorganisme pathogène considéré ;
4. Caractérisation du risque : intégration des étapes n°2 et n°3 pour estimer les probabilités d'infection ou de maladie par évènement et/ou annuelles et les effets sur la santé (WHO, 2016a).

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

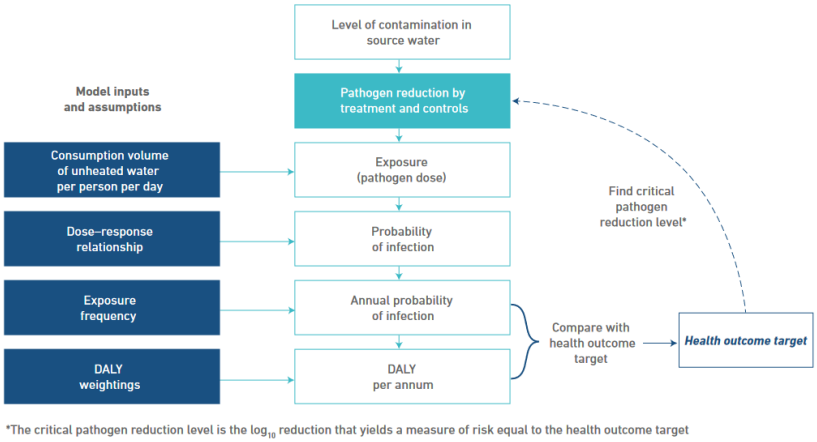


Figure 7 : Présentation des différentes étapes de la QMRA (Petterson, Roser & Deere, 2015 cité par WHO, 2016)

Les résultats obtenus permettent ensuite d'évaluer les mesures de gestion existantes et d'identifier si des mesures supplémentaires doivent être mises en place. Cela est souvent assimilé comme une 5ème étape de la QMRA (NRMMC *et al.,* 2006).

- **Intérêts attendus de la QMRA**

En se basant sur des données provenant d'études scientifiques, la QMRA est considérée comme une méthode plus objective que les évaluations qualitatives et semi-quantitatives pour évaluer les risques. C'est aussi une approche plus transparente et plus détaillée. En effet, elle contribue à une meilleure compréhension du système en considérant l'ensemble de ses composants (de Keuckelaere *et al.,* 2015 ; WHO, 2016a). Elle permet d'évaluer des scénarios de gestion des risques existants mais aussi de simuler des scénarios potentiels. Elle contribue ainsi à une gestion plus proactive des risques (NRMMC *et al.,* 2006), ce qui n'est pas le cas des analyses microbiologiques. En effet, bien qu'elles soient utiles pour connaître la qualité de l'eau, les analyses microbiologiques contribuent à l'identification des risques une fois qu'ils sont déjà survenus. De plus, compte tenu des fréquences d'analyses (qui peuvent parfois être mensuelles) et du délai pour obtenir les résultats, un délai peut être observé entre la survenue du problème (défaillance du traitement, contamination dans les réseaux...) et la réaction (interruption de l'irrigation…) (Drechsel *et al.,* 2022). De plus, les limites associées à l'utilisation d'indicateurs ont été soulevées en particulier en terme de représentativité de l'ensemble des types de micro-organismes. L'absence de ces indicateurs dans les EUT n'est pas toujours synonyme d'absence de risque. Ainsi, des épidémies ont eu lieu dans des systèmes de production d'eau potable bien qu'aucun organisme indicateur n'avait été détecté (Hrudey & Hrudey, 2004 cité par Bichai & Smeets, 2013). La QMRA permet de baser la gestion des risques sur les micro-organismes pathogènes et non sur les indicateurs. Elle permet de considérer un plus large ensemble de micro-organismes pathogènes, de définir des priorités d'action et d'adapter la sélection en fonction des conditions sanitaires des populations (sous condition que des modèles dose-réponse existent). Différents scénarios peuvent être simulés pour vérifier la capacité du système de gestion en place à maîtriser les risques mais aussi à gérer les éventuelles défaillances. Enfin, elle nécessite de réaliser une identification des risques pour son fonctionnement et notamment une identification des populations exposées et des voies d'exposition. Elle permet donc d'aborder différentes notions clés comme les micro-organismes pathogènes, les voies d'exposition, la dose d'exposition mais aussi la contribution des mesures barrières. Cela n'est pas le cas lorsque les objectifs fixés sont des objectifs de réduction à atteindre ou un nombre d'*équivalents barrières.*

La QMRA est mobilisée dans de nombreux domaines : production alimentaire, production d'eau potable, gestion des eaux de baignade, gestion des eaux de surface ainsi que la plupart des usages de REUT. Différentes applications de la QMRA ont été identifiées dans la littérature concernant la REUT agricole, dont voici quelques exemples :

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

- évaluer les risques liés à l'exposition des consommateurs (Shuval *et al.,* 1997 ; Mok *et al.,* 2014 ; Amha *et al.,* 2015) ;
- évaluer les risques liés à l'exposition pour les agriculteurs (Seidu *et al.,* 2008 ; Seis *et al.,* 2022) ;
- évaluer les risques liés à la dispersion d'aérosols (Courault *et al.,* 2017 ; Pepper & Gerba, 2018) ;
- évaluer des filières de traitement (Massiot *et al.,* 2023) et les optimiser (Foschi *et al.,* 2022);
- identifier des points critiques dans le système de REUT (WHO, 2016a) ;
- analyser les cadres normatifs existants (Shuval *et al.,* 1997 ; Mara and Sleigh, 2010 ; Rock *et al.,* 2019) et proposer des lignes directrices pour de nouveaux cadres (Seidu *et al.,* 2008) ;
- comparer les risques entre différents usages de REUT existants (Asano *et al.,* 1992) ou différents scénarios d'usage (agricole, urbain, industriel…) (Hajare *et al.,* 2021).

Au-delà des études scientifiques sur les risques associés à la REUT, la QMRA est également mobilisée pour construire les cadres normatifs (NRMMC *et al.,* 2006 ; WHO, 2006). Comme indiqué dans la première partie, l'OMS a mobilisé la QMRA pour établir les objectifs de réduction à atteindre. Le RE 2020/741 se base sur les critères de qualité qui existaient à l'échelle de l'UE mais aussi sur les objectifs définis dans les directives de l'OMS. Cette réglementation s'est donc construite indirectement grâce à la QMRA (European Commission, 2018).

En 2016, l'OMS publie des directives concernant l'utilisation de la QMRA pour assurer une gestion sécurisée de l'eau. Trois objectifs sont annoncés : i) présenter un cadre harmonisé pour l'application de la QMRA pour les filières d'eau potable, d'eaux usées et d'eaux récréatives ii) fournir des orientations pour l'interprétation des données scientifiques qui sont utilisées iii) donner des conseils sur la mise en place et l'interprétation des résultats. Les régulateurs, les ingénieurs et gestionnaires des systèmes d'approvisionnement en eau et d'assainissement ainsi que les scientifiques sont indiqués comme public visé par ces directives (WHO, 2016a). Des outils ont été développés pour la production d'eau potable sous format *Excel* comme proposé par le Canada (Santé Canada, 2019) ou sous format d'un outil en ligne comme aux Pays-Bas (QMRAspot[3]) où les fournisseurs d'eau potable doivent réaliser une QMRA tous les quatre ans (Schijven *et al.,* 2011).

La QMRA présente donc un certain nombre d'intérêts. Néanmoins, elle est considérée comme plus difficile à mobiliser. En effet, elle nécessite des connaissances plus poussées et un ensemble de données qui ne sont pas toujours disponibles selon les contextes. Les résultats sont difficiles à interpréter sans un accompagnement suffisant (WHO, 2016a). Dans le guide technique proposé par le *Joint Research Center*[4] (JRC) pour réaliser le plan de gestion des risques demandé par le RE 2020/741, il est indiqué que la QMRA doit être mobilisée pour des systèmes de REUT à haut niveau de risques et lorsque suffisamment de données sont disponibles (Maffettone & Gawlik, 2022). Le « *Sanitation Safety Planning manual »* ou « *Planification de la gestion de la sécurité sanitaire de l'assainissement »* (PGSSA) est un guide réalisé par l'OMS dans le but d'opérationnaliser ses directives de 2006 et faciliter leur mise en œuvre (Drechsel *et al.,* 2022). Il y est indiqué que les méthodes quantitatives ne sont généralement pas utilisées par les équipes de PGSSA (WHO, 2016b). Son application se limite généralement aux cadres académiques et reste complexe à appliquer sur le terrain (WHO, 2016a). En comparaison à la production d'eau potable, les données sont généralement plus difficiles à obtenir pour la REUT en particulier pour les volumes d'exposition et les fréquences associées. Comme nous allons le voir dans la section 1.2.4 (p.46), les voies d'exposition sont multiples et variables contrairement à l'eau potable où seule l'ingestion d'eau est concernée avec un volume plus facile à estimer (environ 1,5 L) et une fréquence plus fixe (365 jours par an). Compte tenu des limites liées aux connaissances scientifiques actuelles (méthodes de détection des micro-organismes pathogènes, modèle dose-réponse, paramètres d'exposition …), la QMRA se base sur de nombreuses hypothèses (Dickin *et al.,* 2016 ; WHO, 2016a). Ces hypothèses peuvent tendre à des hypothèses assez conservatrices et basées sur des scénarios « *le plus défavorable »* qui peuvent conduire à une sur-estimation des risques (WHO, 2016a). Enfin, un manque d'harmonisation des paramètres mais aussi des choix pour caractériser les risques est observé à l'échelle

[3] https://www.rivm.nl/en/who-collaborating-centre-risk-assessment-of-pathogens-in-food-and-water/tools/qmraspot

[4] *Le JRC, ou Centre commun de recherche, est le laboratoire de recherche scientifique et technique de la Commission européenne. Il fournit des connaissances et de données scientifiques visant notamment à soutenir les politiques de l'UE.*

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

internationale et font l'objet de nombreux débats (Zhiteneva *et al.,* 2020). Nous aborderons ces éléments plus en profondeur lors de la présentation des paramètres retenus.

Malgré ces éléments, il nous semblait intéressant de mobiliser la QMRA pour les raisons suivantes :

- pour d'aborder différentes notions clés à l'évaluation de risques comme la dose d'exposition, les populations exposées, les micro-organismes pathogènes ;
- pour baser la construction des scénarios de gestion sur des données plus objectives ;
- pour explorer l'utilisation de cette méthodologie avec des acteurs du terrain et analyser l'intérêt qu'elle pourrait représenter pour la gestion des risques liés à la REUT.

Nous allons voir, dans la prochaine section, qu'elle peut être utilisée selon différents niveaux de complexité.

1.2.2 Construction d'un modèle QMRA qui soit mobilisable par les acteurs du terrain

Selon l'objectif associé à la QMRA et les données disponibles, l'évaluation quantitative peut être réalisée selon différents niveaux de finesse (et donc de complexité) : d'une « *screening-level* » à une « *in-depth* » QMRA. Ces niveaux ne diffèrent pas par leur nature mais plutôt par les données requises, le niveau de précision des données ou encore la complexité mathématique. Ainsi, une QMRA « *screening-level »* permet une analyse préliminaire des risques et de comprendre de manière assez large les facteurs de risque et collecter différentes informations sur le système (WHO, 2016a). Les paramètres peuvent se baser sur des données de la littérature (Zhiteneva *et al.,* 2021) et les calculs n'intègrent pas nécessairement les variabilités associées à ces paramètres. Les paramètres se basent sur des hypothèses généralement conservatrices, ce qui peut parfois tendre à sur-estimer les risques. Ce type de QMRA est appelée « déterministe ». Les directives australiennes de 2006 proposent ce niveau de QMRA. Néanmoins, c'est un niveau très simplifié. En effet, les paramètres de la QMRA sont généralement variables et incertains. C'est le cas, par exemple, de la concentration en micro-organismes pathogènes, des volumes d'exposition ou encore des paramètres du modèle dose-réponse. Des méthodes statistiques peuvent alors être mobilisées, comme la méthode de Monte-Carlo, pour générer des valeurs aléatoires des paramètres à partir de distributions. Elles permettent alors de calculer les probabilités de risque en intégrant les variations et les incertitudes associées aux paramètres. C'est ce qu'on appelle des QMRA « probabilistes ». Bien qu'elles soient plus précises, elles correspondent à un niveau de QMRA plus complexe (WHO, 2016a). Quel que soit le niveau de complexité choisi, il est important que les hypothèses et les choix soient clairement explicités pour clarifier la provenance des résultats et leur portée (Zhiteneva *et al.,* 2020).

Compte tenu des objectifs associés à notre modèle que nous avons mentionnés dans la section précédente, nous avons choisi de construire une première version avec des paramètres fixes (déterministe) et basés sur des données de la littérature. Le modèle est construit sur *Excel*, un outil informatique facilement mobilisable par les acteurs du terrain. Le modèle est « exploratoire », il n'a pas pourvocation de réaliser une évaluation précise des risques mais plutôt de permettre d'aborder les éléments clés comme indiqué précédemment.

Pour construire notre modèle, la recherche s'est d'abord centrée sur les paramètres indiqués par les directives de l'OMS (2006) mais aussi les directives australiennes (2006). La recherche s'est ensuite élargie aux articles scientifiques mobilisant la QMRA pour analyser les risques associés à la REUT agricole. Les guides méthodologiques sur la QMRA en général ont également été mobilisés (Haas, Rose et Gerba, 2014 ; WHO, 2016a) ainsi que le portail collaboratif *QMRAwiki* qui propose différentes ressources pour aider l'application de la QMRA ainsi que les outils en ligne disponibles (INOWAS tool, QMRAspot). Les données étant parfois limitées, la recherche s'est ensuite élargie à d'autres usages comme les usages urbains ou la production indirecte d'eau potable. Les directives de l'OMS et australiennes datant de 2006, l'objectif était d'analyser les paramètres indiqués par les directives au regard d'une littérature plus récente. Nous verrons que cela a permis d'identifier de nouveaux paramètres à intégrer mais aussi d'identifier des besoins d'actualisation et de caractérisation de certains paramètres.

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

Les paramètres retenus pour notre modèle d'évaluation quantitative des risques sont le sujet des prochaines sections. Ils seront présentés pour chaque étape de la QMRA. L'ensemble des paramètres est résumé en Annexe 3 (p.253). Les paramètres retenus se basent donc sur des choix que nous avons fait et parfois des hypothèses que nous avons établies. Ces éléments ont eu une influence sur les résultats produits. Il est donc important d'analyser les résultats produits au regard de ces éléments. Ces choix ne sont néanmoins pas fixes, les paramètres pourront être adaptés selon les objectifs associés, les systèmes analysés ou encore les évolutions scientifiques. Nous aborderons ces éléments dans les prochaines sections mais aussi lors de la présentation des résultats dans le Chapitre 3.

Nous allons d'abord nous intéresser à la première étape : la sélection des micro-organismes pathogènes pertinents pour réaliser notre évaluation des risques.

1.2.3 Etape 1 - Formulation du problème : sélection des micro-organismes pathogènes

Les micro-organismes présents dans les eaux usées sont nombreux et divers. La composition des eaux usées brutes varie fortement selon l'origine des eaux (domestique, industrielle), les caractéristiques du réseau (séparatif, unitaire, mixte) mais aussi selon l'état de santé des populations ou encore les périodes de l'année (WHO, 2006 ; Anses, 2012a). Ces micro-organismes sont classés en 4 types : les bactéries, les virus, les protozoaires et les helminthes. Les eaux usées peuvent également contenir d'autres éléments présentant des risques sanitaires comme les toxines, des champignons, des moisissures ou encore des levures. Ces éléments ne seront pas abordés car ils ne sont pas intégrés dans la réglementation et la QMRA n'est pas réalisable sur ces éléments. Certains micro-organismes sont dits « *pathogènes* », c'est-à-dire qu'ils représentent un danger pour la santé humaine (Beaupoil *et al.,* 2010). Ils peuvent être d'origine fécale ou issus de l'environnement (Anses, 2012a). Il a été choisi de ne pas présenter en profondeur les différents types de micro-organismes pathogènes car la littérature est abondante sur le sujet. Des données sont disponibles dans le rapport de l'Anses sur la REUT pour l'irrigation des cultures, l'arrosage des espaces verts par aspersion et le lavage des voieries (2012a) ainsi que dans d'autres études (Beaupoil *et al.,* 2010 ; WHO, 2016a ; Carré, 2017).

La première étape d'une QMRA consiste à formuler le problème : i) sélectionner le ou les micro-organismes pathogène(s) qui présentent un intérêt pour l'évaluation des risques et ii) quantifier leur présence dans les eaux étudiées c'est-à-dire à quelle concentration sont-ils présents. Nous nous sommes donc demandés quels micro-organismes sont pertinents pour notre modèle, sur quels critères doivent-ils être choisis et comment définir les données de concentration.

1.2.3.1 Choix du ou des micro-organismes pathogènes de référence

- **Recommandations des cadres normatifs et choix identifiés dans la littérature**

Dans leurs directives de 2006, l'OMS et l'Australie ont retenu trois micro-organismes pathogènes : *Campylobacter jejuni* (bactérie), rotavirus (virus) et *Crypstosporidium parvum* (protozoaire). Pour assurer des résultats représentatifs, l'OMS conseille ainsi de considérer au moins un microorganisme de référence pour chaque type (WHO, 2016a). En effet, les micro-organismes pathogènes ont des caractéristiques qui leur sont propres : concentration dans l'eau, capacité d'infection, effets sur la santé, résistance aux procédés de traitements et aux conditions de l'environnement… Ces caractéristiques varient selon les types de micro-organismes. Les directives australiennes indiquent ainsi plusieurs critères pour sélectionner un microorganisme pathogène de référence pour une QMRA : présent en grande quantité dans les eaux usées et possibilité de quantification, présente des risques sanitaires importantes (forte prévalence, infectiosité, pouvoir pathogénique…), pertinence vis-à-vis des données de la population étudiée, faible élimination par les procédés de traitement en particulier avancés, longue survie dans l'environnement et un modèle dose-réponse est disponible (NRMMC *et al.,* 2006). Les trois micro-organismes retenus par les directives de l'OMS et les directives australiennes font partie des agents pathogènes d'origine hydrique à l'origine de nombreux

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

problèmes sanitaires et des modèles dose-réponse ont été établis (Havelaar & Melse 2003 ; WHO, 2006 ; NRMMC *et al.,* 2006).

Depuis 2006, des avancées ont néanmoins été faites en terme de techniques d'analyse de risques et de développement de modèles dose-réponse. Des études récentes recommandent désormais l'utilisation de norovirus à la place de rotavirus. Ce virus est considéré comme une meilleure référence puisqu'il touche l'ensemble de la population contrairement à rotavirus qui infecte plutôt les enfants. Un modèle dose-réponse est désormais disponible ce qui n'était pas le cas en 2006 (Drechsel *et al.,* 2011 ; Zhiteneva *et al.* 2021). Norovirus est responsable de nombreuses épidémies de gastro-entérite virale de l'adulte en France et a été utilisé dans plusieurs études scientifiques mobilisant la QMRA pour la REUT (Courault *et al.,* 2017). Il serait donc pertinent de retenir ce microorganisme à la place de rotavirus. Le choix du modèle dose-réponse ne fait néanmoins pas consensus, ce qui peut freiner la sélection de ce microorganisme (Santé Canada, 2019). La littérature indique également que la concentration en norovirus est généralement assez faible en été (période d'irrigation), les pics étant plutôt hivernaux (Seis *et al.,* 2022). Réaliser l'évaluation uniquement sur norovirus risquerait donc de ne pas être représentatif de l'ensemble des virus présents dans les eaux usées. Courault *et al.* (2017) ont cependant retrouvé des concentrations dans les eaux usées de la station de Clermont-Ferrand assez élevées même pendant l'été (entre 10^4 et 10^5 GC/L pour les mois de mai et juin 2015, et > 10^5 GC/L pour le mois de juillet 2015) contrairement aux rotavirus qui n'ont pas été sur ces mois. Une concentration en rotavirus >10^5 GC/L avait cependant été détectée pour le mois de juillet 2014. Etablir le choix concernant le virus de référence n'est donc pas évident. En effet, aucun virus ne comporte l'ensemble des caractéristiques d'un virus de référence idéal. De plus, les rotavirus sont difficilement cultivables et nécessitent l'utilisation de méthodes moléculaires contrairement aux adénovirus et aux entérovirus qui ont cependant un taux d'infection faible (NRMMC *et al.,* 2006). L'évaluation des risques s'appuie donc généralement sur les caractéristiques de différents virus (Santé Canada, 2019). Cela explique pourquoi rotavirus avait été sélectionné par les directives de l'OMS et australiennes bien que ce virus concerne plutôt les enfants.

- **Choix effectués pour notre modèle**

Compte tenu des différences entre les micro-organismes pathogènes d'un même type, il est intéressant d'en retenir plusieurs pour un même type (Zhiteneva *et al.,* 2021). Ainsi, rotavirus et norovirus ont été retenus pour notre modèle. *Campylobacter jejuni* et *Cryptosporidium parvum* ont également été sélectionnés afin de suivre les recommandations de l'OMS et qu'ils font parties des principaux micro-organismes pathogènes présents dans les eaux usées en France métropolitaine (Beaupoil *et al.,* 2010). Ce choix était également pertinent vis-à-vis des données épidémiologiques françaises fournies par Santé Publique France qui indique que les infections à campylobacter sont une cause fréquente de gastro-entérites bactériennes dans les pays développés dont une majorité d'infections sont causées par *C.jejuni* (Santé Publique France, 2023).

- **Besoins identifiés et évolutions possibles du modèle**

D'autres micro-organismes pathogènes ont été sélectionnés dans la littérature pour la REUT agricole : Salmonella chez les bactéries (Amha *et al.,* 2015), *Legionella pneumophilia* chez les bactéries (Hamilton *et al.,* 2018 ; Pepper & Gerba, 2018 ; Massiot *et al.,* 2023), les Adenovirus (Gonzales-Gustavson *et al.,* 2019) ou encore Giardia chez les protozoaires (Orlofsky *et al.,* 2016). Ces micro-organismes mentionnés n'ont pas été sélectionnés pour cette première version de notre modèle. L'objectif était de réaliser un modèle représentatif mais simple d'utilisation. Nous avons donc limité le nombre de micro-organismes pathogènes sélectionné. D'autres micro-organismes pourraient être intégrés dans une version future en particulier *Legionella pneumophilia*, une espèce appartenant au genre des légionnelles qui est responsable de la majorité des infections sévères. Elle a été retrouvée à de fortes concentrations en entrée et en sortie de stations d'épuration (Massiot *et al.*, 2023). Elle est transmise par l'inhalation d'où l'obligation de son suivi s'il existe un risque de formation d'aérosols (RE 2020/741). Il pourrait donc être intéressant de l'intégrer

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

ultérieurement dans le modèle. L'Anses indique également que le suivi des nématodes intestinaux uniquement pour l'irrigation des pâturages ou des fourrages frais est également discutable car les œufs d'helminthes sont très résistants aux traitements de désinfection et ont une longue persistance dans l'environnement et risquerait d'accroître le risque de contamination des produits irrigués avec des EUT (Ajonina *et al.,* 2015 cité par Anses, 2023). Certaines études ont utilisé la QMRA pour évaluer les risques liés aux helminthes (Mara & Sleigh, 2010 ; Navarro & Jiménez, 2011). Cependant, la littérature est peu abondante sur le sujet et concerne principalement les pays du sud. Les données épidémiologiques françaises indiquent que les infections liées notamment à Ascaris concernent généralement les personnes revenant des pays chauds. Ils n'ont pas donc pas été intégrés dans notre modèle.

Pour conclure, les micro-organismes pathogènes de référence pour le modèle sont : *C.jejuni* pour les bactéries, rotavirus et norovirus pour les virus, *C.parvum* pour les protozoaires.

Une fois les micro-organismes sélectionnés, il s'agit maintenant de définir les concentrations associées dans les eaux usées. Dans notre cas, nous partirons des eaux usées brutes (entrée de traitement secondaire) afin de pouvoir évaluer les effets des différentes barrières sur l'ensemble de la filière. Il est néanmoins possible de réaliser l'évaluation à partir de données de concentration en sortie de filière de traitement (Zhiteneva *et al.,* 2020).

1.2.3.2 Obtention des données de concentration

- **Recommandations des cadres normatifs et choix identifiés dans la littérature**

Les micro-organismes pathogènes sont présents à différentes concentrations dans les eaux usées. Lorsque les données en conditions réelles ne sont pas disponibles, les concentrations attribuées se basent sur des données de la littérature. Ainsi, les travaux scientifiques utilisés par l'OMS pour établir ses directives de 2006 utilisent des ratios en lien avec la concentration en *E.coli*. Ainsi, l'OMS se base sur les travaux de Shuval *et al.* (1997) où 10^5 *E.coli* = 0,1 à 1 campylobacter, 0,1 à 1 rotavirus et 0,01 à 0,1 oocystes de cryptosporidium. Dans leur étude, Mara & Sleigh (2010) utilisent également ces ratios pour norovirus : 10^5 *E.coli* = 0,1 à 1 norovirus. Selon Silverman *et al.* (2013), ces auteurs sont probablement basés sur le ratios associé au rotavirus pour établir celui du norovirus. D'autres possibilités ont été identifiées comme, par exemple, l'utilisation de données de la littérature provenant des cadres normatifs et/ou d'études aux conditions similaires (Zhiteneva *et al.,* 2021). Par exemple, dans ses directives pour l'eau potable, l'OMS indique que la concentration dans les eaux usées est de 10 à 10^5 campylobacter pour 100mL, 5 à 5 x 10^2 rotavirus pour 100mL et 0,1 à 10^3 cryptosporidium pour 100mL (WHO, 2022). Certains auteurs utilisent des ratios en lien avec la charge fécale. La concentration en micro-organismes pathogènes est alors estimée grâce à l'estimation du taux d'excrétion fécale humaine (Mok *et al.,* 2014).

- **Choix effectués pour notre modèle**

Pour établir nos paramètres fixes, les ratios indiqués par l'OMS (2006) et dans la littérature (Mara & Sleigh, 2010) ont été retenus. La valeur maximale du ratio (10^5 *E.coli* = 1 pour campylobacter, rotavirus et norovirus et 10^5 *E.Coli* = 0,1 pour cryptosporidium) a été utilisée. La concentration initiale en *E.coli* a été définie à partir des objectifs de concentration indiqués par le RE 2020/741. Ainsi, il est indiqué qu'une concentration ≤ 10 *E.coli* /100mL doit être atteinte pour la qualité A. Cette concentration permet d'irriguer l'ensemble des cultures. Un objectif de performance de la filière de traitement ≥ 5 log est indiqué. A partir de ces éléments, il a donc été considéré que la concentration en *E.coli* dans les eaux usées est égale à 10^6 nombre/100mL. Cette concentration se situe dans les fourchettes indiquées par l'OMS dans ses directives pour l'eau potable (2022) (entre 10^5 et 10^9 nombre/100mL) et le rapport de l'Anses (2012) (entre 10^5 et 10^6 UFC/100mL). Les concentrations obtenues se situent également dans le même ordre de grandeur que les concentrations utilisées par les directives de l'OMS (2006) et australiennes (2006) pour les exemples de QMRA ayant servi à définir les objectifs de réduction. Les données sont présentées dans le Tableau 4.

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

Type	Microorganisme pathogène	Unité	Valeur fixe
Bactéries	Campylobacter	Nombre /100mL	10^2
Virus	Rotavirus	Nombre /100mL	10^2
	Norovirus	Nombre /100mL	10^2
Protozoaires	Cryptosporidium	Nombre/100mL	10^1

Tableau 4 : Concentrations retenues dans notre modèle pour les micro-organismes pathogènes sélectionnés

- **Besoins identifiés et évolutions possibles du modèle**

La méthodologie des ratios indiquée dans les directives de l'OMS pour la REUT (2006) et les données indiquées dans celles pour l'eau potable (2022) présentent des limites. Les unités sont indiquées en « *nombre/L* ». Cette unité indique que les micro-organismes ont été considérés comme un nombre total sans distinction entre les unités viables (infectieuses) et non viables contrairement aux unités UFC/L ou GC/L. Cela peut également entrainer une surestimation des risques. La méthode la plus précise serait d'utiliser des données du terrain. Néanmoins, ces données ne sont pas toujours disponibles, en particulier si le cadre normatif n'exige pas le suivi des micro-organismes pathogènes retenus dans le modèle. Ainsi, l'arrêté français (2023) impose ainsi le suivi *d'E.coli* pour les bactéries*, des* coliphages (totaux/F-spécifiques/somatiques) pour les virus et des spores de *Clostridium perfringens* ou des bactéries anaérobies sulfito-réductrices et leurs spores pour les protozoaires. Le RE 2020/741 propose également ces indicateurs mais indique que « *Les pathogènes de référence campylobacter, rotavirus et cryptosporidium peuvent aussi être utilisés pour la surveillance de validation, à la place des micro-organismes indicateurs proposés »* (RE 2020/741). Compte tenu néanmoins de la nécessité d'utiliser des méthodes moléculaires pour rotavirus et norovirus, les ratios de l'OMS (2006) pourraient être utilisés dans l'attente des données. Néanmoins, les ratios proviennent d'une revue de littérature datant de 1995 pour rotavirus, d'une étude sur de lagunes de maturation au Brésil datant de 1986 pour campylobacter et d'une étude sur une filière de lagunage au Kenya datant de 1993 pour rotavirus et cryptosporidium (WHO, 2016a). Ces ratios pourraient être actualisés au regard de données plus récentes. Des auteurs indiquent que des bases de données sur les concentrations seraient nécessaires (Zhiteneva *et al.,* 2020). Des projets internationaux ont été lancés comme le *Global Water Pathogen Project* pour rassembler ces données (Université d'Etat du Michigan/UNESCO). Cette base de données pourrait également être créée pour la REUT en France. La concentration est un paramètre clé dans la QMRA et qui peut être fortement variable. Il serait donc intéressant de considérer cette variation dans une version future.

1.2.3.3 Calcul de la concentration après la filière de traitement

Les procédés de traitement secondaires et tertiaires contribuent à réduire la concentration en micro-organismes dans les eaux usées. La concentration dans les EUT ($C_{eau,\ EUT}$) est donnée par l'Équation 1 (Mok *et al.,* 2014) :

$$\boldsymbol{C_{eau,EUT} = C_{eau,EUB} * 10^{-(Red_{PTS} + Red_{PTA})}}$$

Avec $C_{eau,\ EUB}$ = la concentration fixe dans les eaux usées brutes ; Red_{PTS} et Red_{PTA} = les réductions (unité log_{10}) apportées par respectivement les procédés de traitement secondaire et les procédés de traitement avancés existants ou pouvant être mis en place à l'échelle de la station d'épuration ou au-delà.

Équation 1 : Estimation de la concentration en micro-organismes pathogènes après la filière de traitement

Les procédés secondaires et tertiaires ont été distingués afin de pouvoir évaluer leur contribution respective. Les réductions attribuées aux différents procédés seront présentés dans la section 1.3.2 (p.71).

Pour résumer cette première étape, quatre micro-organismes pathogènes ont été retenus pour notre modèle et des concentrations dans les eaux usées brutes ont été définies. Après avoir intégré la contribution de la

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

filière de traitement et estimé la concentration dans les EUT pour chaque microorganisme pathogène que nous avons retenu, il s'agit désormais d'estimer la dose à laquelle différentes populations pourraient être exposées. C'est le sujet de la prochaine section.

1.2.4 Etape 2 - Evaluation de l'exposition : construction des scénarios d'exposition

- **Recommandations des cadres normatifs et choix identifiés dans la littérature**

La deuxième étape de la QMRA consiste à établir les scénarios d'exposition à évaluer, c'est-à-dire : i) identifier les « *populations* » potentiellement exposées à des micro-organismes pathogènes associés à l'utilisation d'EUT, ii) par quelles « *voies* » ces populations sont exposées et iii) à quelle « *dose* ».

En effet, des micro-organismes pathogènes peuvent être présents dans les EUT, même après traitement. Ils peuvent alors se retrouver dans l'environnement à travers différents « *matrices* » :

- Dans l'eau utilisée pour l'irrigation ;
- Sur les cultures irriguées et donc sur le produit final après récolte ;
- Dans le sol ;
- Dans encore dans l'air (WHO, 2006 ; Dickin *et al.,* 2016 ; Adegoke *et al.,* 2018).

Des « *populations* » peuvent alors être exposées à ces micro-organismes pathogènes via ces matrices qui sont alors appelées des « *vecteurs d'exposition ».* Les études épidémiologiques ont permis d'identifier plusieurs groupes de populations exposées :

- les consommateurs ;
- les travailleurs agricoles et leurs familles ;
- les communautés proches (WHO, 2006).

Les experts du JRC identifient également les professionnels en charge du traitement supplémentaire ainsi que les professionnels post-récolte (distributeurs…) comme populations exposées. Concernant les professionnels post-récolte, ils sont néanmoins considérés comme étant en dehors des limites du système de REUT à étudier pour l'évaluation des risques telles que définies par les experts du JRC (Maffettone & Gawlik, 2022). Ces limites sont représentées en rouge sur la Figure 8 présentée ci-dessous.

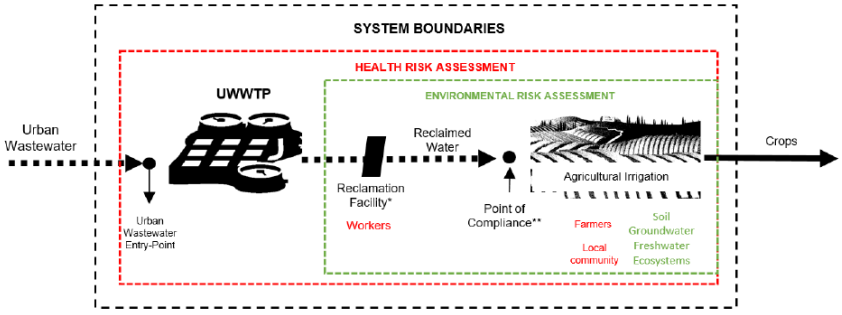


Figure 8 : Limites du système pour l'évaluation des risques (Maffettone & Gawlik, 2022)

Les consommateurs ne sont également pas intégrés dans les limites du système et il est indiqué qu'ils ne doivent pas être pris en compte dans l'évaluation des risques (Maffettone & Gawlik, 2022). Cela peut s'expliquer par l'absence de son intégration comme acteur éventuel de la gestion des risques. Les risques doivent donc être suffisamment géré avant la distribution au consommateur. Le consommateur est cependant une des populations exposées les plus étudiées dans la littérature mobilisant la QMRA pour évaluer les risques associés à la REUT agricole. L'exclusion des distributeurs soulève également des interrogations comme tenu de leur implication éventuelle pour mettre en place les mesures post-récolte et

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

de leur potentielle exposition. Néanmoins, aucune étude n'a cependant été retrouvée dans la littérature concernant leur exposition.

- **Choix effectués pour notre modèle**

L'objectif est donc de construire des scénarios d'exposition à intégrer à notre modèle. Concernant les populations exposées, les groupes suivants ont été retenus :

- Les professionnels en charge du traitement supplémentaires et les travailleurs agricoles ;
- Les non-professionnels vivant à proximité du périmètre irrigué (les riverains) ou circulant à proximité (les passants) ainsi que les consommateurs des produits irrigués.

Compte tenu du nombre d'études portant sur l'exposition du consommateur, ce groupe a été retenu pour notre modèle contrairement aux indications des experts du JRC. Néanmoins, les professionnels post-récolte n'ont pas été intégrés puisqu'aucune étude n'a été identifiée. Concernant les familles des professionnels, ils existent très peu de données sur leur exposition et les études proviennent principalement des pays à faible revenu où les non-professionnels (notamment les enfants …) travaillent dans les champs. Nous avons considéré que cette situation n'était pas présente dans notre contexte d'étude. Les familles peuvent néanmoins être contaminées par transmission secondaire. Cette voie fait appel à un niveau plus complexe de QMRA (WHO, 2016a). Nous avons donc fait le choix de ne pas intégrer ce groupe dans cette première du modèle. Nous verrons dans le chapitre 3 que ces populations ont parfois été identifiées lors de l'utilisation du modèle sur des cas concrets (voir Chapitre 3). Enfin, les caractéristiques des individus comme l'âge, la santé, le sexe, le statut immunitaire et d'autres facteurs, qui influencent les probabilités de risques, n'ont pas été considérés par souci de simplification du modèle (Courault *et al.,* 2017).

L'exposition de ces populations aux micro-organismes pathogènes se fait par différentes « *voies* » : ingestion, inhalation ou contact cutané (WHO, 2016a). Les voies « inhalation » et « contact cutané » n'ont pas été retenues pour cette première version comme nous allons le voir.

Concernant le contact cutané, l'enjeu sanitaire associé (par exemple, les maladies cutanées) est considéré comme moindre que celui associé aux deux autres voies (Damaceno *et al.,* 2022). L'exposition par contact cutané n'est pour autant pas négligeable compte tenu des potentiels risques d'infection qui peuvent s'opérer par la peau, en particulier par les coupures (Haas *et al.,* 2014). Son intégration dans l'évaluation des risques fait cependant appel à des paramètres qui lui sont spécifiques et qui auraient complexifiés notre modèle. L'objectif étant d'obtenir un modèle simplifié, elle n'a pas donc pas été intégrée. Elle pourra l'être dans une version ultérieure comme l'ont fait Busgang *et al.* (2018) pour évaluer les risques associés à l'utilisation des eaux ménagères.

La voie « inhalation » concerne les aérosols qui peuvent être projetés lors de l'utilisation de systèmes d'irrigation par aspersion (Courault *et al.,* 2017). L'inhalation conduit à l'infection des voies respiratoires (WHO, 2022). Elle est donc associée à des micro-organismes pathogènes s'attaquant à ces voies comme les adénovirus ou encore *Legionnella pneumophilia* (WHO, 2016a). L'évaluation de l'exposition à l'inhalation nécessite des paramètres plus poussés, et notamment l'utilisation de modèles de dispersion atmosphérique pour évaluer la dispersion des aérosols (Courault *et al.,* 2017). C'est donc une voie que nous avons considérée comme plus complexe à étudier. L'exposition aux aérosols est évaluée dans la littérature en considérant l'inhalation (Courault *et al.,* 2017 ; Chhipi-Shrestha *et al.,* 2019) mais aussi l'ingestion (NRMMC *et al.,* 2006 ; Busgang *et al.,* 2018). Par souci de simplification, nous n'avons donc retenue que la voie « ingestion ». Néanmoins, lors l'utilisation du modèle avec les acteurs du terrain, nous avons employé le terme « inhalation » pour désigner l'exposition aux aérosols dispersés dans l'air. C'était une erreur de notre part puisque cela correspondait à une ingestion. Ce choix a eu plusieurs conséquences sur les résultats produits et les interprétations associées qui seront abordées dans le Chapitre 3. Compte tenu des spécificités associées à cette voie, il serait important de pouvoir l'intégrer.

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

En résumé, les voies d'exposition retenues pour notre modèle sont :

- L'ingestion directe de micro-organismes pathogènes via l'ingestion de gouttelettes d'eau qui projetés ou dispersés par l'ensemble des systèmes d'irrigation (que nous appellerons voie « Eau ») ;
- L'ingestion directe via l'ingestion d'aérosols dispersés par les systèmes d'irrigation par aspersion et micro-aspersion (appelée voie « Air ») ;
- L'ingestion indirecte après un contact cutané avec la plante irriguée puis un portage « main-bouche » (appelée voie « Plante ») ;
- L'ingestion indirecte après un contact avec le sol puis un portage « main-bouche » (appelée voie « Sol ») ;
- L'ingestion directe via l'ingestion du produit final (appelée voie « Produit »).

Chaque voie d'exposition est caractérisée par une « dose d'exposition », c'est-à-dire : i) un volume ou une quantité de matrice ingérée et ii) une concentration en micro-organismes pathogènes associée à la matrice. Une fréquence est également associée pour caractériser l'occurrence de l'exposition d'une population donnée à une voie d'exposition. Elle est généralement exprimée en jour par an. Des données sont proposées dans les directives de l'OMS (2006) et australiennes (2006) concernant ces éléments. Ces données proviennent d'études nationales ou de recherches scientifiques que nous allons présenter. Les directives n'indiquent néanmoins pas de données pour les voies « Eau », « Air », « Plante ». Les données issues de la littérature ont donc été utilisées. Ces éléments seront le sujet des prochaines sections. Nous allons donc présenter les différents scénarios d'exposition qui ont été établis dans notre modèle en se basant sur cet ensemble de données.

1.2.4.1 Ingestion via le produit final (voie « Produit »)

- **Recommandations des cadres normatifs et choix identifiés dans la littérature**

L'ingestion directe du produit final par le consommateur est une des voies les plus étudiées pour l'évaluation des risques associés à la REUT agricole. Elle est caractérisée par deux éléments : i) un volume résiduel, c'est à dire le volume d'eau restant sur le produit après l'irrigation (généralement exprimée en mL pour 100 gr) contenant des micro-organismes pathogènes, ii) une quantité de produit ingérée par évènement (gr/évènement).

En effet, des micro-organismes pathogènes peuvent adhérer sur les surfaces des végétaux et être ensuite ingérés par les consommateurs des produits finaux (WHO, 2006). L'OMS indique, par exemple, qu'un volume de 10 à 15 mL persiste pour 100 gr de laitue et 1 à 5 mL pour 100 gr d'oignons. Le volume résiduel indiqué pour la salade provient de l'étude de Shuval *et al.* (1997). Dans cette étude, des chercheurs israéliens ont estimé le volume d'eau qui pourrait s'accrocher à la surface des végétaux irrigués avec des eaux usées et notamment sur la surface des parties comestibles. Leur analyse a été réalisée en laboratoire et à partir de l'immersion d'une laitue dans des eaux usées. Le volume résiduel sur la culture a été estimé à environ 10,8 mL pour 100 gr de laitue et 0,36 mL pour 100 gr de concombre. Cette différence de volume entre les deux végétaux est due aux propriétés physiques des feuilles de la laitue qui permettent aux micro-organismes de s'accrocher contrairement à la surface plus lisse du concombre (Shuval *et al.,* 1997). Ainsi, la prise en compte des propriétés physiques des végétaux est importante dans les évaluations des risques (NRMMC *et al.,* 2006).

L'ingestion de salade irriguée avec des eaux usées est considérée comme le cas « le plus défavorable ». Elle est cultivée près du sol, elle est généralement beaucoup irriguée et elle est consommée crue. Ses larges feuilles lui confèrent un plus grand potentiel de contamination (WHO, 2006). Leurs surfaces irrégulières protègent les micro-organismes pathogènes des impacts des conditions environnementales (UV notamment) (de Keuckelaere *et al.,* 2015). Ces surfaces rendent également plus difficiles la contribution des préparations post-récolte telles que le lavage (WHO, 2006). C'est pour ses raisons qu'elle a été retenue pour l'OMS (2006) pour calculer les objectifs de réduction à atteindre. Comme présenté dans la première partie, l'oignon a également été retenu par l'OMS (2006). En effet, des études épidémiologiques réalisées au Mexique ont mis

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

en lumière des risques de contamination élevés associés à cette culture (Blumenthal *et al.,* 2003 cité par WHO, 2006). Le volume résiduel utilisé pour calculer les risques associés à la consommation d'oignon est plus faible que celui sur la laitue : 1 à 5 mL pour 100 gr. Ces données proviennent des travaux de Mara *et al.* (2007). Néanmoins, aucune information concernant les conditions expérimentales ayant permis d'estimer le volume résiduel pour l'oignon n'a été trouvée.

Les directives australiennes de 2006 mentionnent également d'autres études qui ont estimé le volume persistant sur les cultures irriguées avec des eaux usées. Par exemple, une étude portant sur trois types de chou, a estimé un volume persistant allant de 3,3 à 8,9 mL pour 100 gr. Cette même étude a estimé un volume de 1,9 mL pour 100 gr pour le brocoli (Hamilton, 2005 cité par NRMMC *et al.,* 2006). Pour les « *autres produits consommés crus* », les directives australiennes considèrent un volume résiduel de 1 mL pour 40 gr et une fréquence de 140 jours par an (NRMMC *et al.,* 2006). Pour les cultures non consommées crues, aucune information n'est néanmoins indiquée. Ainsi, les données concernant les volumes résiduels ne sont pas toujours disponibles pour l'ensemble des cultures. Ainsi, lorsque les données concernant les volumes résiduels n'existent pas, les données existantes de cultures ayant des caractéristiques physiques similaires (à feuille, culture racinaire…) sont utilisées. Par exemple, pour leur étude, Ito *et al.* (2017) reprennent les données de Shuval *et al.* (1997) et distinguent ainsi deux catégories : les cultures « *à feuille* » où un volume de 10 mL pour 100 gr est attribué (en se basant sur les données de la laitue) et les cultures « *non feuillu* » où un volume de 3,6 mL pour 100 gr est attribué (en se basant sur les données du concombre). Autre exemple, Mara & Sleigh (2009) ont retenu un volume résiduel de 3 à 5 mL pour 100 gr de carottes. Des données qui semblent provenir de celles utilisées pour l'oignon par les auteurs dans une étude antérieure (Mara *et al.,* 2007).

Au-delà du volume résiduel, la quantité consommée par évènement et la fréquence annuelle de consommation sont également des paramètres à définir. Shuval *et al.* (1997) ont utilisé leurs données pour estimer les risques associés à la consommation de salade et de concombre grâce à la QMRA. Les données de consommation retenues se sont basées sur des données nationales : 100 gr par évènement pour une fréquence de 150 jours par an. L'OMS considère également une quantité consommée de 100 gr pour la salade et l'oignon mais avec une fréquence plus élevée : tous les deux jours, soit une fréquence annuelle de 182,5 jours par an (WHO, 2006). La salade est également utilisée dans les directives australiennes de 2006 pour fixer les objectifs de réduction. Les données de Shuval *et al.* (1997) y sont reprises mais adaptées au contexte australien. Ainsi, la quantité consommée est de 40 gr par évènement pour une fréquence plus faible, de 70 jours par an (NRMMC *et al.,* 2006). Les données d'exposition peuvent donc être adaptées selon les contextes locaux. Dans la littérature, certains auteurs adaptent les paramètres en fonction des données nationales (Seidu *et al.,* 2008 ; Amha *et al.,* 2015 ; Gonzales-Gustavson *et al.* 2019). D'autres se basent sur des enquêtes réalisées sur les terrains étudiés (Busgang *et al.,* 2018 ; Hajare *et al.,* 2021) ou sur des données provenant d'études épidémiologiques (Mara *et al.,* 2007). Une fréquence de 365 jours par an, soit une consommation quotidienne a également été utilisée dans certaines études. Cette hypothèse est reconnue comme conservatrice. Néanmoins, l'objectif était de simuler des scénarios *les plus défavorables* (Tanaka *et al.,* 1998 ; Amah *et al.,* 2015).

En résumé, des volumes résiduels (mL/100gr ou mL/gr) ont été estimés pour certaines cultures en conditions laboratoires. Ces données sont utilisées pour évaluer les risques associés aux cultures dont les volumes résiduels n'ont pas été estimés. Les quantités consommées par évènement (gr/évènement) et les fréquences annuelles (jour/an) indiquées par l'OMS proviennent d'études épidémiologiques. Elles peuvent être adaptées aux données nationales ou au terrain d'étude.

- **Choix retenu pour le modèle**

Au final, les cadres réglementaires nous a permis de retenir différentes valeurs pour les paramètres associés à cette voie (Tableau 5).

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

Produit final	Volume résiduel (V_{ing}) (mL/100gr)			Quantité ingérée par évènement (Q_{ing}) (gr/évènement)			Fréquence de l'évènement (n) (j/an)		
	Min	*Max*	*Référence*	*Min*	*Max*	*Référence*	*Min*	*Max*	*Référence*
Salade	10	15	Shuval *et al.,* 1997	40	100	NRMMC *et al.,* 2006 ; WHO, 2006	70	182,5	NRMMC *et al.,* 2006 ; WHO, 2006
Oignon	1	5	WHO, 2006	100	100	WHO, 2006	140	182,5	NRMMC *et al.,* 2006 ; WHO, 2006
Concombre	3,6	3,6	Shuval *et al.,* 1997	100	100	Shuval *et al.,* 1997	140	182,5	NRMMC *et al.,* 2006 ; WHO, 2006
Chou	3,3	8,9	NRMMC *et al.,* 2006	100	100	NRMMC *et al.,* 2006	140	182,5	NRMMC *et al.,* 2006 ; WHO, 2006
Brocoli	1,9	1,9	NRMMC *et al.,* 2006	100	100	NRMMC *et al.,* 2006	140	182,5	NRMMC *et al.,* 2006 ; WHO, 2006
Carotte	3	5	Mara & Sleigh, 2009	100	100	Mara & Sleigh, 2009	140	182,5	NRMMC *et al.,* 2006 ; WHO, 2006 ; Mara & Sleigh, 2009

Tableau 5 : Paramètres identifiés pour la voie d'exposition « Produit »

Les valeurs retenues ont varié au cours du développement et de l'utilisation du modèle. Par exemple, pour les quantités consommées par évènement, les données proposées par l'OMS (2006) ont d'abord été utilisées (100gr par évènement). Les données proposées par les directives australiennes (2006) mais aussi d'autres données identifiées sur les sites des Chambres d'Agriculture ou FranceAgriMer, nous ont amené à prendre d'autres valeurs. Les fréquences ont également été adaptées. Les valeurs retenues ont parfois été bien plus faibles que les directives de l'OMS (2006) et australiennes (2006). Par exemple, l'OMS (2006) considère une consommation tous les deux jours pour la salade. C'est une estimation assez élevée par rapport aux données de consommation que nous avons identifiées lors de nos recherches. Nous avons donc parfois considéré une fréquence de consommation plus faible (par exemple, une fois par semaine soit 48 jours par an). Concernant les volumes résiduels, les volumes attribués ont également varié avec l'évolution des recherches et les besoins associés au modèle. Ainsi, les cultures largement utilisées dans la littérature comme la salade ou l'oignon ont été sélectionnées. Néanmoins, comme nous le verrons plus en détail dans le chapitre 2, d'autres cultures sont apparues pertinentes à étudier. Elles permettaient d'aborder différents éléments associés à la gestion des risques : classe de qualité requise, système d'irrigation utilisé, populations exposées... D'autres cultures ont donc été ajoutées comme la pomme de terre, la pomme ou encore la tomate. Cependant, des informations concernant les volumes résiduels n'ont pas été identifiées pour ces cultures. Pour attribuer les volumes résiduels, nous avons donc fait le choix d'attribuer ceux des cultures ayant des caractéristiques physiques de la partie comestible similaires : présence d'une peau, peau lisse ou rugueuse, culture racinaire… Les valeurs choisies ont néanmoins varié selon les cas d'étude avec l'avancée des recherches bibliographiques. Les valeurs retenues pour chaque cas sont présentées avec les résultats des QMRA réalisées (Annexe 11 à Annexe 13). Comme nous le verrons dans le prochain paragraphe, elles seraient à mieux caractériser.

Une internalisation de micro-organismes pathogènes par les racines ou par la plante a pu être observée par certains auteurs (Solomon *et al.,* 2002 cité par WHO, 2006 ; Reyes *et al.,* 2020). Néanmoins, la prise en considération de cette possibilité dans l'évaluation des risques ne fait pas consensus dans la littérature. Les mécanismes d'internalisation des micro-organismes interviennent dans des conditions particulières : lorsqu'ils sont présents en grandes quantités dans les eaux usées réutilisées (10^6 UFC/100mL) (Salomon *et al.,* 200 cité par WHO, 2006), lorsque les plantes sont endommagées ou blessées (Aruscavage *et al.*, 2008 ; Fatemi *et al*., 2006 cités par Dreschel *et al.,* 2011 ; Bernstein *et al.*, 2007b cité par Loudhiaef, 2021) et sur les jeunes feuilles (Enriquez *et al.,* 2003 cité par Reyes *et al.,* 2020). Comme indiqué par Drechsel *et al.* (2011), ces risques seraient à considérer s'ils présentaient un facteur de risque plus important que la contamination en surface. Les risques d'internalisation n'ont donc pas été considérés dans notre modèle. Thomas *et al.* (2024) indiquent néanmoins que les mécanismes des interactions entre les pathogènes et les surfaces des cultures permettant leur survie et leur internalisation doivent être mieux compris. Par ailleurs, l'accumulation des micro-organismes à la surface des végétaux sous l'effet des épisodes successifs d'irrigation a été

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

considérée comme négligeable, compte tenu des mécanismes de dépérissement naturel (voir 1.3.4.2. Utilisation des EUT : définition du programme d'irrigation, p.88) à la surface des cultures (Mok *et al.,* 2014).

Au final, la dose d'exposition associée à cette voie ($D_{ing,\ produit}$) est calculée grâce à l'Équation 2 :

$$\boldsymbol{D_{ing,produit} = C_{eau,EUT} \times V_{ing,prod} \times Q_{ing,prod}}$$

Avec $C_{eau,\ EUT}$ = la concentration du microorganisme pathogène considéré dans l'eau usée traitée calculée grâce à l'Equation 1 (nombre/L) ; $V_{ing,\ prod}$ = le volume résiduel par gramme de quantité ingérée (L/gr), $Q_{ing,\ prod}$ = la quantité ingérée (gr/évènement)

Équation 2 : Estimation de la dose d'exposition par évènement pour la voie « Produit »

- **Besoins identifiés et évolutions possibles du modèle**

Il serait nécessaire de se baser les paramètres sur des enquêtes de consommation nationales pour une meilleure estimation des risques. Les études individuelles nationales des consommations alimentaires (INCA) réalisées par l'Anses pourraient être une ressource intéressante pour estimer ces données. Des recherches seraient également à mener pour mieux caractériser les volumes restant sur les végétaux. Pour la tomate par exemple, les volumes attribués par Ito *et al.* (2017) sont ceux du concombre. Or la surface rugueuse du concombre permet une adhésion plus facile que la surface lisse de la tomate (WHO, 2006). Le volume résiduel pourrait être attendu comme plus faible. De plus, les volumes estimés pour la salade par Shuval *et al.* (1997) ont été réalisés dans des conditions laboratoires où les salades étaient immergées dans les eaux usées. Ce cas de figure correspond à un scénario *le plus défavorable* où l'irrigation est réalisée par submersion. Ces conditions sont reconnues comme conservatives et pouvant tendre à une sur-estimation du risque (NRMMC *et al.*, 2006). Cependant, faute de données, ces estimations sont largement reprises dans la littérature. Ils seraient intéressant de pouvoir estimer ces volumes pour un plus large panel de cultures.

1.2.4.2 Ingestion indirecte après contact cutané avec le sol (voie « Sol ») ou la plante (voie « Plante »)

- **Recommandations des cadres normatifs et choix identifiés dans la littérature**

Dans ses directives de 2006, l'OMS indique également des objectifs de réduction à atteindre pour les travailleurs agriculteurs : 3 log en cas d'agriculture fortement mécanisée et de 4 log en cas d'agriculture à forte intensité de main d'œuvre. Ces réductions permettent d'assurer un objectif de 10^{-6} $DALYs_{pppa}$ pour ces populations. Pour calculer ces réductions, l'OMS s'est basé sur les travaux de Mara et *al.* (publiés ultérieurement en 2007). Ces auteurs reprennent les résultats d'études épidémiologiques qui ont montré que les travailleurs agricoles peuvent être exposés aux micro-organismes pathogènes via l'ingestion indirecte de particules de sol. En effet, un transfert « main-bouche » peut avoir lieu et entrainer une ingestion indirecte de micro-organismes pathogènes. Cette ingestion est estimée entre 0,01 et 0,1 mg par personne et par jour d'exposition (Haas *et al.,* 1999 ; OMS, 2001 cité par WHO, 2006). La quantité ingérée dépend du type d'agriculture. En cas d'agriculture « *fortement mécanisée* », c'est-à-dire dans les pays industrialisés où les agriculteurs *« labourent, sèment et récoltent avec des tracteurs et des équipements associés et portent habituellement des gants lorsqu'ils travaillent dans les champs* », les quantités sont estimées à 0,001 à 0,01 mg pour une fréquence de 100 jours par an. Dans le cas d'une agriculture « *à forte intensité de main-d'œuvre* » « *dans les pays en développement (…) où l'on n'utilise pas (ou pas souvent) de tracteur et où le port des gants n'est pas courant* », la quantité ingérée est plus élevée : de 10 mg à 100 mg avec une fréquence de 300 jours par an. Pour définir la concentration en micro-organismes pathogènes dans le sol, il est considéré que le sol est saturé. Ainsi, le nombre *d'E.coli* pour 100mL d'eaux usées est également le nombre *d'E.coli* pour 100 gr de sol (WHO, 2006 ; Mara *et al.,* 2007). Au-delà des directives de l'OMS (2006) et des travaux de Mara *et al.,* (2007 ; 2010), aucune étude n'a été retrouvée concernant les risques associés à l'ingestion de particules de sol lors de l'utilisation d'eaux usées pour l'irrigation agricole.

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

Une contamination via un transfert « main-bouche » peut également avoir lieu après un contact cutané avec la plante. Les directives australiennes considèrent alors une ingestion d'un volume de 1mL. Ce volume est indiqué lors de l'utilisation d'EUT pour l'irrigation des jardins privés et de l'irrigation municipale. Aucune étude n'a été identifiée concernant cette voie pour l'irrigation agricole et elle n'est pas mentionnée l'OMS (2006). Le besoin d'intégrer cette voie a été confirmé lors du travail de co-construction réalisée avec les acteurs du cas de Clermont-Ferrand, qui est le sujet de notre deuxième chapitre. En effet, du personnel agricole intervient l'entretien et la récolte des cultures et notamment pour la castration manuelle du maïs semence. Les risques sanitaires associés à l'utilisation des EUT pour ce personnel ont été questionnés. Il nous semblait donc intéressant d'intégrer cette voie bien que peu de données soit à disposition.

- **Choix retenu pour le modèle**

Les valeurs indiquées par l'OMS ont été retenues pour la voie « Sol » et celles des directives australiennes pour la voie « Plante ». Les fréquences ont été adaptées à partir de la littérature et des dires d'acteurs lors de la co-construction (voir Chapitre 2). En effet, les fréquences indiquées par l'OMS semblent correspondre à un scénario *le plus défavorable* puisque l'irrigation n'est généralement pas étendue sur l'année entière (Mara *et al.,* 2007). Ces fréquences ont donc été modifiées. Il a été considérée que l'entretien des cultures après l'irrigation dure quatre mois et la récolte était sur un mois. En l'absence de données précises, nous avons fait l'hypothèse que le personnel intervenant pour l'entretien des cultures est considéré comme exposé entre 20 et 48 jours et le personnel de récolte entre 7 et 20 jours. Les paramètres finaux retenus sont présentés dans le Tableau 6.

		Voie « Plante »		**Voie « Sol »**			**Fréquence (jour /an)**		
		Volume ingéré (mL/évènement)		Quantité ingérée (gr/évènement)					
Activité	**Explication**	*Valeur*	*Référence*	*Faiblement mécanisée*	*Fortement mécanisée*	Référence	*Min*	*Max*	Référence
Entretien des cultures	Activités d'entretien manuel de la culture (désherbage, taillage …)	1	NRMMC *et al.,* 2006	0,1	0,01	WHO, 2006	20	48	Dires d'experts et hypothèses
Récolte des cultures	Récolte manuelle des cultures	1	NRMMC *et al.,* 2006	0,1	0,01	WHO, 2006	7	20	Hypothèses

Tableau 6 : Paramètres retenus pour les voies d'exposition « Sol » et « Plante »

La dose d'exposition pour la voie « Plante » ($D_{ing,plante}$) est ensuite estimée grâce à l'Équation 3 et pour la voie « Sol » ($D_{ing,sol}$) grâce à l'Équation 3 :

$$\boldsymbol{D_{ing,plante} = C_{eau,EUT} \times V_{ing,plante}}$$

Avec $C_{eau,EUT}$ = la concentration dans l'eau réutilisée du microorganisme pathogène calculée avec l'Equation 1 (nombre/L), $V_{ing,\ plante}$ = le volume résiduel restant sur la plante et ingéré (L/évènement).

Équation 3 : Estimation de la dose d'exposition pour la voie « Plante »

$$\boldsymbol{D_{ing,sol} = C_{eau,EUT} \times Q_{ing,sol} \times 10^{-3}}$$

Avec $C_{eau,EUT}$ = la concentration dans l'eau réutilisée du microorganisme pathogène calculée avec l'Equation 1 (nombre/L), $Q_{ing,sol}$ = la quantité de sol potentiellement ingérée (g/évènement).

Équation 4 : Estimation de la dose d'exposition pour les voies « Sol » et « Plante »

Comme pour les produits finaux, l'accumulation des micro-organismes dans le sol ou sur la plante suite aux évènements successifs d'irrigation a été considéré comme compensée par leur inactivation naturelle (Mok *et al.,* 2014 ; Beaudequin *et al.,* 2015). Certains auteurs ont cependant indiqué qu'il serait également

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

intéressant de considérer l'impact des épisodes successifs d'irrigation en particulier pour le sol bien que cela dépende de la qualité de l'eau utilisée (Uyttendaele *et al.,* 2015 ; Allende *et al*., 2018). Ces éléments sont abordés dans la section 1.3.4.2 consacrée au dépérissement naturel (p.88).

- **Besoins identifiés et évolutions possibles du modèle**

Une caractérisation plus fine serait à faire pour prendre en compte la variabilité des quantités potentiellement ingérées selon les activités réalisées (Antwi-Agyei *et al.,* 2016). Comme pour l'ingestion des produits, on peut attendre que les volumes résiduels dépendent du système d'irrigation utilisé, du volume apporté, de la distance avec le système d'irrigation ou encore des propriétés physiques des cultures. Il aurait été intéressant de caractériser plus en profondeur les données de notre modèle par des enquêtes sur le terrain lors de la co-construction avec les acteurs du terrain (abordé dans le Chapitre 2). Les fréquences d'exposition que nous avons retenues peuvent paraître faibles. Elles ont été estimées par culture dans notre modèle. En effet, le modèle s'intègre dans un jeu de rôle (abordé dans le Chapitre 2) où il a été considéré que chaque joueur incarnait une parcelle avec un type de cultures et que son personnel d'entretien et de récolte intervenait uniquement pour cette culture. Ce choix explique donc les fréquences qui peuvent sembler assez faibles par rapport aux valeurs de l'OMS (2006). Nous aborderons plus en détail les impacts de ce choix dans le Chapitre 3.

1.2.4.3 Ingestion directe de gouttelettes d'eau (voie « Eau ») et d'aérosols (voie « Air)

- **Recommandations des cadres normatifs et choix identifiés dans la littérature**

Les travailleurs agricoles, notamment réalisant l'irrigation, peuvent être exposés aux eaux usées réutilisées et donc aux micro-organismes pathogènes qui y sont présents. Les communautés vivant à proximité sont éventuellement exposées en particulier lors de l'utilisation de systèmes d'irrigation par aspersion (WHO, 2006). En effet, ces systèmes produisent des aérosols qui peuvent alors être transportés dans l'air. Ces aérosols peuvent atteindre les habitations ou les chemins situés à proximité des périmètres irrigués. Les aérosols peuvent alors être inhalés par ces populations (Anses, 2012a). Selon l'OMS, les risques associés à l'inhalation des aérosols peuvent également concerner les travailleurs agricoles (WHO, 2006). Dans son étude des risques associés à l'utilisation des EUT pour l'irrigation agricole et l'arrosage des espaces verts, l'Anses considère que le travailleur n'est pas présent dans le champ au moment de l'aspersion. L'Anses précise qu'ils sont davantage exposés aux EUT par contact cutanéo-muqueux (circulation sur les surfaces dès la fin de l'arrosage, manipulation des équipements…) que par voie respiratoire (Anses, 2012a). L'analyse par QMRA indiquée par l'OMS dans ses directives de 2006 n'intègrent pas l'ingestion de gouttelettes d'eau ou l'inhalation d'aérosols. Néanmoins, il est indiqué qu'il existe un risque accru d'infection lorsque la concentration en CT atteint 10^6 /100 mL mais qu'aucune association n'a été constatée entre l'utilisation d'eau partiellement traitée (10^4 – 10^5 CT/100mL) et l'accroissement du taux d'infections virales. Ainsi, la concentration dans les eaux usées est un facteur important (WHO, 2006). Des valeurs sont proposées dans les directives australiennes de 2006 concernant l'ingestion de gouttelettes. Pour les aérosols, seule la voie « ingestion » est mentionnée. Ces valeurs sont proposées pour l'irrigation des jardins et l'irrigation municipale avec, respectivement, une ingestion d'une volume d'aérosols de 0,1 mL et 1 mL par évènement. Une fréquence de 90 jours par an est indiquée pour ces deux scénarios. Une ingestion accidentelle de 100 mL arrivant une fois par an est proposée pour l'irrigation de jardins (NRMMC *et al.,* 2006). Il peut paraître surprenant qu'aucune valeur ne soit indiquée dans les directives de l'OMS (2006) et australiennes (2006) pour l'irrigation agricole bien que l'exposition des travailleurs agricoles et des communautés situées à proximité soit reconnue. Concernant la voie « inhalation », les directives australiennes indiquent que les informations de l'époque ne sont pas suffisantes pour caractériser les risques associés. Il est alors indiqué que des mesures doivent être mises en place pour minimiser les risques d'exposition associés notamment aux aérosols (NRMMC *et al.,* 2006). Comme nous le verrons ultérieurement, des mesures barrières sont également indiquées dans les directives de l'OMS (2006).

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

Certaines études mobilisent la QMRA pour estimer les risques associés à l'ingestion de gouttelettes d'eau par les travailleurs agricoles lors de l'utilisation de différents systèmes d'irrigation : arrosoirs (Seidu *et al.,* 2008), tuyaux d'arrosage (Hajare *et al.,* 2021), fonctionnant par aspersion (Ito *et al.,* 2017 ; Seis *et al.,* 2022). Ito *et al.* (2017) ont évalué les risques pour des travailleurs d'une ferme en agriculture intensive au Japon associés à l'utilisation d'EUT avec des sprinklers et autres systèmes par aspersion. Une volume d'exposition de 1 mL par jour a été retenu pour une fréquence de 300 jours par an (Ottoson & Stenström, 2003 ; Mara *et al.,* 2007). Dans l'étude de Seis *et al.* (2022), les risques sont évalués pour des travailleurs agricoles en Allemagne. Ces travailleurs sont exposés lors des travaux d'installation et de maintenance du système d'irrigation. Deux scénarios d'ingestion d'EUT ont été évalués : i) un volume d'exposition de 0,1 mL a été considéré avec une fréquence de deux fois par semaines dans le cas d'une irrigation annuelle et ii) un volume d'exposition de 1 mL avec une fréquence d'une fois par semaine dans le cas d'une irrigation uniquement de mai à septembre. La valeur de 1 mL semble provenir de l'étude d'Asano *et al.* (1992). Dans cette étude, les auteurs ont modélisé les risques liés à plusieurs virus entériques provenant d'eaux usées réutilisées (chlorée et non chlorée) grâce à la QMRA. Ils ont analysé différents usages dont l'irrigation de produits maraîchers et l'irrigation de terrain de golfs. L'exposition des professionnels agricoles n'est pas évaluée dans cette étude mais un volume de 1 mL est indiqué pour les golfeurs manipulant et nettoyant les balles. Cette valeur a ensuite été reprise dans de nombreuses études. On pourrait également émettre l'hypothèse qu'elle a pu être utilisée dans les directives australiennes de 2006. L'estimation du 0,1 mL semble provenir des directives australiennes (NRMMC *et al.,* 2006) qui indiquent cette valeur pour l'ingestion d'aérosols lors de l'irrigation des jardins. Ces valeurs semblent présenter quelques limites pour représenter l'exposition des travailleurs agricoles. Nous aborderons cela dans le paragraphe consacré aux besoins identifiés et aux évolutions possibles du modèle.

Concernant les risques associés à la dispersion des aérosols et donc de l'exposition des populations vivant (riverains) ou circulant (passants) à proximité des périmètres irrigués, les études sont plus nombreuses. Les aérosols sont des gouttelettes dont le diamètre est inférieur à 0,150 mm (Molle *et al.,* 2009). Dans son étude de 2012, l'Anses établit différents scénarios d'exposition pour les riverains et les passants. Les passants peuvent être exposés aux aérosols lorsqu'ils passent directement sous le jet. L'hypothèse est faite que les passants longent une surface d'un hectare à une vitesse de quatre km/h. Ils mettent alors une minute pour parcourir 100 mètres. Il est donc considéré qu'ils exposés une minute les jours d'arrosage. Les riverains sont exposés lors du passage du jet à proximité des habitants. Ils sont exposés deux secondes toutes les minutes pendant les 2,27 heures passées dans le jardin. Ces données proviennent du *Exposure factors Handbook* publié par l'US-EPA en 2010. Cela représente donc 4,5 minutes par jour d'arrosage. L'Anses considère la fréquence d'exposition est de 20 jours par an. Ces données ont été évaluées à partir des besoins annuels en eau du maïs et les apports journaliers pour une campagne de quatre mois (Deumier *et al.,* 2006 cité par Anses, 2012a).

Les études portant sur les risques associés aux aérosols indiquent que de nombreux facteurs clés sont à considérer pour l'évaluation des risques liés à l'aspersion. La proportion d'aérosols représente généralement moins de 3 % du volume d'irrigation, ce qui n'est pas toujours considéré dans les évaluations des risques (Molle *et al.,* 2009 ; Zardari *et al.* 2022). Elle varie selon les systèmes d'irrigation de même que le potentiel de dérive qui va dépendre de la pression de fonctionnement, du débit délivré ou encore de la portée (Molle *et al.,* 2009). Les conditions opérationnelles appliquées par les agriculteurs telles que l'orientation ou la hauteur sont également importantes. Une distinction serait donc à faire entre les systèmes d'irrigation en particulier les systèmes d'aspersion pour l'évaluer des risques. D'autres facteurs influencent également fortement le potentiel de dispersion comme la distance entre les zones sensibles (chemins, habitations…) et le système d'irrigation ainsi que la vitesse du vent. Zardari *et al.* (2022) ont estimé que pour une distance entre 20 et 40m de la tête du sprinkler et une hauteur de 1m au-dessus du sol, le transport aérien diminuait de 20,8 et 3,43 $mL.m^{-2}.h^{-1}$ à moins de 2,89 et 0,13 $mL.m^{-2}.h^{-1}$ pour des vitesses de vent de 3,6 et 1,1 ms^{-1} respectivement. Les conditions atmosphériques jouent également un rôle important notamment les fortes

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

températures, le degré d'humidité, la radiation solaire qui impactent sur la viabilité des micro-organismes (Courault *et al.,* 2017 ; Zardari *et al.,* 2022).

- **Choix retenu pour le modèle**

Les paramètres initialement retenus pour notre modèle sont présentés dans le Tableau 7.

	Volume ingéré (mL/évènement)			Fréquence (jour /an)		
Populations concernées	*Min*	*Max*	*Référence*	*Min*	*Max*	Référence
Travailleurs agricoles	1	-	Seis *et al.,* 2020	20	40	Seis *et al.,* 2020, dires d'experts
Personnel en charge du traitement supplémentaire	5	-	Heida *et al.,* 2024	100	-	Hypothèse
Riverains	0,4	10	Hypothèse	20	-	Anses, 2012a
Passants	0,8	20	Hypothèse	20	-	Anses, 2012a

Tableau 7 : Paramètres retenus pour les voies d'exposition « Eau » et « Air »

Les valeurs indiquées par Seis *et al.* (2022) pour une campagne d'irrigation de mai à septembre (1mL, une fois par semaine) ont été retenues pour l'ingestion de gouttelettes d'eau (« Eau ») ou d'aérosols (« Air ») par les travailleurs agricoles intervenant lors de l'irrigation. Nous verrons que ces paramètres ont été discutés et également adaptés lors de la co-construction avec les acteurs de Clermont-Ferrand (chapitre 2). Pour le personnel en charge du traitement supplémentaire, seul le personnel intervenant sur des filières de traitement qui ne sont pas intégrées dans des stations d'épuration a été retenu dans notre modèle. C'est le cas, par exemple, des lagunes de maturation pour le cas de REUT de Clermont-Ferrand. Notre modèle se limite à l'évaluation des risques associés à la REUT. Une valeur fixe de 5 mL a été retenue bien que ces estimations proviennent d'une filière de traitement intégrant le secondaire et que cela peut être variable selon les procédés mobilisés. Il a été considéré que l'unité de traitement fonctionnait sur les cinq mois de la campagne d'irrigation et que l'exposition était de cinq jours par semaine.

Les volumes d'exposition des riverains et des passants ont été plus difficiles à établir. Pour les riverains, seule l'exposition aux aérosols a été retenue. Il a été considéré que les agriculteurs n'arrosaient pas les jardins. Nous verrons que ces éléments ont été discutés lors de l'utilisation du modèle (Chapitre 3). En se basant sur la littérature et en particulier les travaux de Molle *et al.* (2009), une formule avait été développée pour calculer la proportion d'aérosols et de gouttelettes produites en fonction des systèmes d'irrigation, de la distance vis-à-vis du jet d'irrigation et de la vitesse du vent. Les volumes estimés étaient de l'ordre de la dizaine de mL. Ces données ont été retenues lors de l'utilisation de notre modèle avec notre premier cas d'étude (Clermont-Ferrand). La comparaison avec les autres volumes d'exposition indiqués par les directives de l'OMS et australiennes de 2006 mais aussi la littérature nous a amenés à remettre en question notre formule et à la modifier pour les autres ateliers. Par exemple, Busgang *et al.* (2018) considèrent ainsi l'ingestion de 0,1 mL avec une variation de 0,05 à 0,2 mL lorsque les habitants sont présents dans leur jardin pendant l'irrigation (en se basant sur les données de NRMMC *et al.,* 2006 ; Maimon *et al.,* 2010 et Busgang *et al.,* 2015). Ces volumes sont bien inférieurs à ceux que nous avions estimé (Tableau 7). Les volumes qui ont été utilisés à Porquerolles et dans la Drôme sont de l'ordre du mL ce qui nous paraissaient plus cohérents avec les données des directives australiennes (2006). Néanmoins, ces valeurs négligent des éléments clés associés à la dispersion des aérosols et pourraient tendre à sur-estimer les risques associés. De grandes incertitudes persistent donc sur notre formule. L'utilisation de ces valeurs a soulevé différentes interrogations concernant les résultats de l'évaluation des risques obtenus. Ces éléments seront abordés dans le Chapitre 3. Pour la voie « Air », il a également été considéré que cette voie ne concernait pas cryptosporidium car l'Anses indique qu'aucune étude n'a été retrouvée concernant la présence des protozoaires dans les aérosols (Anses, 2012a).

La dose d'exposition pour les voies « Eau » et « Air » est ensuite estimée grâce l'Équation 5 :

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

$$D_{ing,eau/aérosols} = C_{eau,REUT} \times V_{ing,eau/aérosols}$$

Avec $C_{eau,REUT}$ = la concentration dans l'eau réutilisée du microorganisme pathogène considéré pour cette voie (nombre/L) et $V_{ing,eau}$ = le volume de gouttelettes d'eau ou d'aérosols ingéré (L/évènement)

Équation 5 : Estimation de la dose d'exposition pour les voies « Eau » et « Air »

- **Besoins identifiés et évolutions possibles du modèle**

Comme mentionné précédemment, les volumes d'exposition associés à l'ingestion de gouttelettes d'eau par les travailleurs agricoles seraient à mieux caractériser. En effet, les scénarios d'exposition des golfeurs ou des non-professionnels lors de l'irrigation des jardins semblent assez éloignés de ceux des agriculteurs or ces données sont généralement reprises pour les agriculteurs. Les évaluations des risques pour les travailleurs agricoles pour la REUT sont assez peu nombreuses en comparaison avec celles pour les consommateurs ce qui semblent assez surprenant puisque ce sont les plus exposés aux EUT. Concernant les risques associés aux aérosols, des modèles de dispersion atmosphérique comme les modèles gaussiens seraient à utiliser pour mieux évaluer la dispersion des aérosols et estimer les volumes d'exposition associés. Ils permettent également d'intégrer l'impact des conditions environnementales, de la distance et du vent ainsi que la proportion inhalée. Ces modèles sont cependant complexes et ne sont pas toujours pertinents pour les faibles distances et dans des conditions de faible vent. Des recherches ont été développées pour proposer de nouveaux modèles tels que les travaux de Zardari *et al.* (2022). La voie « inhalation » serait également à intégrer pour pouvoir considérer les risques associés aux infections respiratoires comme par exemple celles associées à la bactérie *L.pneumophilia* (Courault *et al.* 2017 ; Pepper and Gerba, 2018 ; Massiot *et al.* 2023). Les fréquences d'exposition seraient également à adapter en fonction des systèmes d'irrigation mais aussi des cultures irriguées.

1.2.4.4 Intégration de la contribution des mesures barrières

La contribution des mesures barrières est à intégrer dans le calcul de la dose. En effet, comme nous le verrons dans la partie 3, certaines mesures contribuent à réduire la concentration en micro-organismes pathogènes sur les voies considérées et d'autres contribuent à réduire les volumes d'exposition. Concernant la contribution de l'inactivation naturelle des micro-organismes au champ, elle est à calculer en fonction du nombre de jour par rapport à la dernière irrigation. La dose finale est obtenue par l'Équation 6.

$$D_{exposition} = D_{ing,(eau/air/plante/sol/produit)} \times 10^{-(\sum Red_{Barr})} \times 10^{(-Red_{Dep} * t)}$$

Avec $D_{ing,\ eau/air/plante/sol/produit}$ = la dose d'exposition calculée dans les étapes précédentes (nombre/évènement), $\sum Red_{Barr}$ = la somme des réductions atteinte par les mesures barrières, Red_{Dep} = la réduction atteinte par la barrière « dépérissement » au champ par jour et t = le nombre de jour après la dernière irrigation.

Équation 6 : Equation permettant de calculer la dose d'exposition finale en intégrant les contributions des mesures barrières

En conclusion, la deuxième étape a donc permis i) d'identifier un ensemble de populations exposées et de voies d'exposition à intégrer au modèle, ii) de construire des scénarios d'exposition auxquels des paramètres d'exposition ont été définis (volume d'exposition, fréquence annuelle…) et iii) d'intégrer la contribution de mesures barrières pour réduire la concentration en micro-organismes pathogènes ou le volume d'exposition.

Il s'agit désormais d'utiliser les modèles dose-réponse pour calculer la probabilité que la dose d'exposition entraine une infection chez les populations exposées.

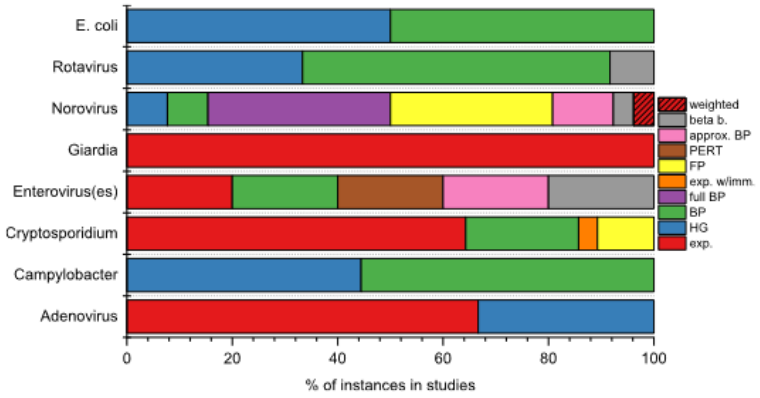
Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

1.2.5 Etape 3 – Intégration du modèle dose-réponse : calcul de la probabilité d'infection

- **Recommandations des cadres normatifs et choix identifiés dans la littérature**

Comme mentionné dans la partie 1, une exposition à une dose en micro-organismes pathogènes n'entraîne pas systématiquement une infection chez l'hôte exposé (Havelaar & Melse, 2003). Le risque d'infection dépend de plusieurs facteurs aléatoires comme la dose d'exposition mais aussi les caractéristiques du microorganisme pathogène considéré. La probabilité d'infection par personne et par jour ($P_{inf,pppj}$) associée à une dose d'exposition (cf sections précédentes) est calculée grâce à des « modèles dose-réponse ». Ces modèles sont des équations mathématiques dont les paramètres proviennent d'études épidémiologiques ou d'études expérimentales réalisées sur les animaux (Hajare *et al.* 2021). Les paramètres sont donc spécifiques à chaque microorganisme pathogène.

Différents modèles dose-réponse existent. Dans les directives de l'OMS (2006) et les directives australiennes (2006), le modèle « Beta-Poisson » (BP) est sélectionné pour *C.jejuni* et rotavirus et le modèle exponentiel pour *C.parvum.* Ces modèles dose-réponse sont les plus souvent utilisés (Zhiteneva *et al.,* 2021). Ils reposent sur une théorie du « *single-hit* » où chaque pathogène ingéré est considéré comme agissant de manière indépendante et ayant une probabilité de provoquer une infection (Haas *et al.* 1999 cité par WHO 2016). Ainsi, un seul organisme qui aurait survécu aux différents barrières de l'organisme peut suffire pour provoquer une infection (Haas *et al.* 1999 cité par Santé Canada, 2019). Concernant *C.parvum,* si le choix d'un modèle exponentiel est fait plutôt consensus dans les directives de l'OMS et australiennes de 2006 ainsi que dans la littérature, les valeurs indiquées pour les paramètres du modèle dose-réponse varient. Pour rotavirus, le modèle dose-réponse retenu par les directives de l'OMS et australiennes et les paramètres associés ont été retrouvés dans la littérature (Stellacci *et al.,* 2010 ; Santé Canada, 2019). Néanmoins, comme le montre la Figure 9, d'autres modèles dose-réponse peuvent être envisagés.



Légende : beta b. = beta binomial, approx.BP = approximated beta poisson, FP = fractional poisson, exp. w/imm = exponentiel avec immunité, BP = beta poisson, HG = hypergeometric, exp=exponentiel

Figure 9 : Différents modèles dose-réponse proposés dans la littérature selon les micro-organismes pathogènes sélectionnés pour la QMRA (Zhiteneva et al., 2020)

Comme le montre la Figure 9, le choix du modèle dose-réponse pour norovirus ne fait pas consensus dans la littérature (Santé Canada, 2019 ; Zhiteneva *et al.,* 2020 Seis *et al.,* 2022). Ainsi, le modèle « Fractional Poisson » developpé par Messner *et al.* (2014) a été utilisé dans des études qui nous ont servi à plusieurs reprises de référence pour construire notre modèle (Courault *et al.,* 2017 ; Zhiteneva *et al.,* 2021). Ce modèle reprend la distribution Poisson mais fractionnée ce qui permet de prendre en compte les doses très faibles mais fortement infectieuses ce qui est le cas pour norovirus. Un modèle hypergéométrique développé par Teunis *et al.* (2008) est utilisé dans d'autres études (Mara & Sleigh, 2010 ; Beaudequin *et al.,* 2015 ; Gonzales-Gustavson *et al.,* 2019). Une version actualisée de ce modèle est utilisée dans l'étude de Seis *et al.* (2022) en se basant sur les données de Teunis *et al.* (2020).

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

- **Choix retenu pour le modèle**

Les modèles retenus, les équations correspondantes ainsi que les paramètres associés sont présentés pour chaque microorganisme dans le Tableau 8.

Modèle	Equation	Micro-organisme	Paramètres	Référence
Beta Poisson	$P_{inf,pppj} = 1 - (1 + \frac{D_{exposition}}{\beta})^{-\alpha}$	*C.jejuni*	α = 0,145 ; β = 7,59	Haas *et al.,* 1999 cité par WHO, 2006
		Rotavirus	α = 0,253 ; β = 0,426	Haas *et al.,*1999 cité par WHO, 2006
Fractional Poisson	$P_{inf,pppj} = P \times \left(1 - e^{\frac{-Dose_{exposition}}{\mu}}\right)$	Norovirus	*P* = 0,722 ; μ = 1106	Messner *et al.,* 2014 cité par Courault *et al.,* 2017 et Zhiteneva *et al.,* 2021
Exponentiel	$P_{inf,pppj} = 1 - e^{(-r \times Dose_{exposition})}$	*C.parvum*	r = 0,0572	QMRA Wiki ; NRMMC *et al.,* 2006

Tableau 8 : Modèles dose-réponse et paramètres retenus pour chaque microorganisme pathogène de référence

Les choix pour campylobacter et rotavirus se basent sur les directives de l'OMS (2006). Pour campylobacter, les paramètres associés sont retrouvés dans des études récentes (Zhiteneva *et al.,* 2021) ainsi que sur le portail collaboratif *QMRA Wiki*. Pour cryptosporidium, la valeur indiquée par les directives australiennes (2006) a été retenue, plutôt que celle préconisée par l'OMS. En effet, cette valeur est retrouvée sur *QMRAWiki.* Néanmoins, une actualisation serait peut-être nécessaire. Pour norovirus, le modèle Fractional Poisson étant plus facile d'utilisation que le modèle hypergéométrique, il a donc été retenu (Courault *et al.,* 2017).

- **Besoins identifiés et évolutions possibles du modèle**

Le choix du modèle dose-réponse et des paramètres du modèle influencent fortement les résultats finaux. Par exemple, l'OMS indique qu'une actualisation du modèle dose-réponse et des paramètres utilisés pour campylobacter pourrait changer les objectifs liés à la filière de traitement pour la production d'eau potable de 5,9 à 7,5 log. L'OMS s'interroge alors si cela serait justifié ou bien trop conservateur (WHO, 2016a). Dans le cas de cryptosporidium, une étude a montré que le risque final avec l'utilisation du modèle Fractional Poisson à la place du modèle exponentiel était 8 fois supérieur (Amoueyan *et al.,* 2019a cité par Zhiteneva *et al.,* 2020). Différents paramètres liés au contexte local peuvent influencer le choix comme les données de concentration (Hamilton *et al.,* 2018) ainsi que les populations étudiées dont l'immunité varie selon les régions mais aussi au sein des populations (Hajare *et al.,* 2021). Pour Zhiteneva *et al.* (2021), il serait intéressant d'utiliser plusieurs modèles dose-réponse pour comparer les résultats obtenus et évaluer l'influence du choix du modèle dans le résultat final. Ces comparaisons n'ont pas été faites dans le cadre de la thèse. Néanmoins, il serait intéressant de pouvoir les réaliser compte tenu de l'absence de consensus pour certains modèles dose-réponse et des paramètres associés.

Cette étape a donc permis d'évaluer une probabilité d'infection associée à la dose d'exposition. Il s'agit désormais d'estimer la probabilité d'infection par an en intégrant la fréquence d'exposition (jour par an). A partir de cette probabilité d'infection annuelle, il existe une probabilité qu'elle mène à une maladie et que cette maladie entraine un effet sur la santé. C'est le sujet de la quatrième et dernière étape de la QMRA que nous allons maintenant aborder.

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

1.2.6 Etape 4 - Caractérisation des risques

1.2.6.1 Estimation des probabilités d'infection et de maladie par an ($P_{mal,\ pppa}$)

- **Recommandations des cadres normatifs et choix identifiés dans la littérature**

Contrairement aux risques chimiques, il est considéré que les risques microbiologiques ne sont pas cumulatifs. Chaque évènement d'exposition est considéré comme un évènement distinct. Les risques sont généralement estimés par exposition ou sur une année permettant ainsi d'estimer un risque global en tenant compte des multiples expositions potentielles. La $P_{inf,pppj}$ est donc estimée en intégrant la fréquence du scénario d'exposition (identifiée lors de l'étape 2) grâce à l'Équation 7 :

$$\boldsymbol{P_{inf,pppa} = 1 - (1 - P_{inf,pppj})^{n}}$$

Avec $P_{inf,d}$ = la probabilité d'infection par évènement pour la voie d'exposition et le microorganisme considéré, n = le nombre d'évènements exposant (jour /an)

Équation 7 : Estimation de la probabilité d'infection par personne et par an

Une infection peut entraîner différents effets sur la santé dont la maladie (Havelaar & Melse, 2003). La dernière étape de la QMRA consiste à estimer la probabilité de maladie par personne et par an ($P_{mal,pppa}$). La $P_{mal,pppa}$ est donc estimée à partir de la $P_{inf,pppa}$ calculée à l'étape n°3 en intégrant le ratio maladie/infection ($R_{mal/inf}$). Ce ratio représente la probabilité qu'une infection aboutisse à une maladie. Il varie selon les micro-organismes pathogènes considérés et ont été estimés à partir de données épidémiologiques. Des ratios sont ainsi indiqués par l'OMS dans ses directives sur l'utilisation des eaux usées (2006) ainsi que sur la production d'eau potable (2022) en se basant sur l'étude de Havelaar et Melse (2003). Néanmoins, les ratios indiqués dans les directives de l'OMS diffèrent en particulier pour rotavirus. Ainsi, les directives pour la REUT (WHO, 2006) indiquent un ratio = 0,05 et les directives pour l'eau potable (WHO, 2022) indiquent un ratio = 0,5. Les directives australiennes (2006) indiquent un ratio = 0,88, un ratio qui est également repris par Santé Canada (2019). Pour campylobacter, Santé Canada (2019) considère un ratio = 1, supposant que toutes les infections mènent à une maladie. Busgang *et al.* (2018) considèrent également un ratio = 1 pour l'ensemble des micro-organismes de leur étude dans l'objectif en justifiant la volonté d'une analyse prudente. Ce choix peut effectivement être fait en l'absence de données considérées comme cohérentes pour la population étudiée (Santé Canada, 2019). Néanmoins, cette approche semble assez précautionneuse puisqu'une infection n'entraine pas systématiquement une maladie (Havelaar & Melse, 2003).

- **Choix retenu pour le modèle**

Au final, les données indiquées par l'OMS dans ses directives pour l'eau potable ont été retenues en l'absence de données adaptées au contexte français. Pour norovirus, les données indiquées par Zhiteneva *et al.* (2021) ont été reprises (Tableau 8).

Microorganisme pathogène	Ratio $_{mal/inf}$	Référence
C.jejuni	0,3	Havelaar and Melse, 2003 cité par WHO, 2006 et WHO, 2022
Rotavirus	0,5	Havelaar and Melse, 2003 cité par WHO, 2022
Norovirus	0,67	Atmar *et al.,* 2013 cité par Zhiteneva *et al.,* 2021
C.parvum	0,7	WHO, 2022

Tableau 9 : Ratio maladie /infection retenus dans le modèle

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

La $P_{mal,pppa}$ est ensuite estimée grâce à l'Équation 8 :

$$\boldsymbol{P_{mal,pppa} = P_{inf,pppa} \times R_{mal/inf}}$$

Avec avec $P_{inf,pppa}$ = la probabilité d'infection par an par personne et $R_{mal/inf}$ le ratio maladie/infection pour le microorganisme pathogène considéré.

Équation 8 : Estimation de la probabilité de maladie par personne et par an

La probabilité de maladie par personne et par an a donc été estimée à partir de la probabilité d'infection par personne et par an et du ratio maladie/infection. Les DALYs perdus associés à cette probabilité de maladie sont ensuite calculés.

1.2.6.2 Estimation des DALYs perdus ($DALYs_{pppa}$)

- **Recommandations des cadres normatifs et choix identifiés dans la littérature**

L'impact sur la santé ou « *charge de morbidité* » lié à la probabilité de maladie calculée précédemment est estimée en DALYs (Santé Canada, 2019). Nous avons présenté cette unité de mesure lors de la partie 1. Les DALYs indiqués par l'OMS (2006 ; 2022) pour chaque microorganisme de référence se basent sur les calculs réalisés par Havelaar et Melse (2003) à partir de données de différents pays. Ces valeurs ont été utilisées dans d'autres études (Zhiteneva *et al.,* 2021). Comme mentionné au début de cette partie, les risques liés à rotavirus affectent particulièrement les enfants. Ainsi, une fraction de susceptibilité (F_s) de 0,06 (6%) est intégrée dans l'équation pour estimer les $DALYs_{pppa}$ pour la population concernée. Pour les autres micro-organismes pathogènes, l'OMS (2006 ; 2022) considère une fraction de susceptibilité égale à 1 (Tableau 10).

Les DALYs perdus indiqués par cas de maladie se basent sur des données englobant différentes populations. Elles ne sont donc pas adaptées à la population française. Ainsi, lorsque les DALYs ne sont pas disponibles pour la population considérée, les auteurs peuvent faire le choix de baser l'évaluation des risques sur la probabilité d'infection annelle ($P_{inf,pppa}$). Les objectifs à atteindre se basent sur les objectifs de santé fixés par l'US-EPA (Courault *et al.,* 2017 ; Hamilton *et al.,* 2018 ; Massiot *et al.,* 2023). En effet, dans ses directives de 2012, l'US-EPA indique un objectif à atteindre pour la REUT qui est exprimé en probabilité d'infection annuelle $<10^{-4}$ pppa et non en DALYs. Les deux approches présentent leurs intérêts et leurs limites.

- **Choix retenu pour le modèle**

Dans notre cas, l'approche par les DALYS a été retenue car elle permet de considérer les différences de sévérité liés aux micro-organismes pathogènes (probabilité de maladie, effets sur la santé…) et de pouvoir les comparer entre eux (Zhiteneva *et al.,* 2021). L'approche par les DALYs permet également d'introduire les notions d'effets sur la santé (infection, maladie…) ce qui était intéressant dans notre cas. De manière générale, l'unité du DALY est une unité commune à de nombreux risques (microbiens, chimiques…) et à de nombreux secteurs (eau potable, alimentaire…). C'est donc une méthodologie commune et qui pourrait permettre des comparaisons entre les secteurs et une unité commune.

Les données indiquées par les directives de l'OMS de 2006 ont été retenues. Pour norovirus, nous nous sommes basés sur l'étude de Zhiteneva *et al.* (2021) (Tableau 10).

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

Microorganisme pathogène	DALYs perdus par cas de maladie ($DALYs_{cas}$)	Référence	Fraction de susceptibilité (F_s)	Référence
Campylobacter	$4{,}6 \times 10^{-3}$	Havelaar et Melse, (2003) cité par WHO (2006 ; 2022)	1	WHO, 2006 ; WHO, 2022
Rotavirus	$1{,}4 \times 10^{-2}$	Havelaar et Melse, (2003) cité par WHO (2006 ; 2022)	0,006	WHO, 2006 ; WHO, 2022
Norovirus	$6{,}23 \times 10^{-3}$	Barker *et al.* (2013) et Mok *et al.* (2014) cités par Zhiteneva *et al.* (2021)	1	Zhiteneva *et al.* (2021)
Cryptosporidium	$1{,}5 \times 10^{-3}$	Havelaar et Melse, (2003) cité par WHO (2006 ; 2022)	1	WHO, 2006 ; WHO, 2022

Tableau 10 : DALYs perdus par cas de maladie et fraction de susceptibilité retenus

Les $DALYs_{pppa}$ sont ensuite estimés par l'Équation 9 :

$$\boldsymbol{DALYs_{pppa} = P_{mal,pppa} \times DALYs_{cas} \times F_s}$$

Avec $P_{mal,pppa}$ = la probabilité de maladie, $DALYs_{cas}$ = DALYs perdu par cas de maladie et F_s = la fraction de susceptibilité

Équation 9 : Estimation des DALYs perdus par an et par personne

- **Besoins identifiés et évolutions possibles du modèle**

Les DALYs perdus pour chaque microorganisme pathogène seraient à adapter aux données de santé de la population française pour une estimation plus précise.

Une fois que les $DALYs_{pppa}$ pour chaque microorganisme pathogène ont été estimés, ils doivent être comparés avec l'objectif du 10^{-6} $DALYs_{pppa}$ pour vérifier si des mesures supplémentaires doivent être mises en place.

1.2.6.3 Vérification de l'atteinte des objectifs sur la santé

- **Recommandations des cadres normatifs et choix identifiés dans la littérature**

L'OMS fixe comme objectif pour la REUT une perte tolérable maximale ≤ 10^{-6} $DALYs_{pppa}$. Comme indiqué dans la section 1, cet objectif est le même que celui pour l'eau potable (WHO, 2006). L'OMS (2006) indique néanmoins qu'il est possible d'adapter cet objectif en fonction des circonstances locales. En effet, cet objectif qui est reconnu comme assez strict et risque d'être difficilement atteignable en particulier dans les pays à faible revenu. L'OMS reconnait qu'un objectif de ≤10^{-5} $DALYs_{pppa}$ voir ≤10^{-4} $DALYs_{pppa}$ peut être suffisant pour assurer une protection de la santé humaine (WHO, 2006 ; Mara & Sleigh, 2009). Le choix de l'objectif sur la santé à atteindre est important car il va modifier la $P_{mal,pppa}$ tolérable et donc la $P_{inf,pppa}$ tolérable qui permettent ensuite d'estimer la réduction log à atteindre grâce aux mesures barrières (Mara & Sleigh, 2009). Cela aura donc des conséquences sur les mesures de gestion à mettre en place. L'objectif ≤ 10^{-6} $DALYs_{pppa}$ est extrêmement sécurisé par rapport à l'incidence réelle des maladies diarrhéiques dans le monde (Mara and Sleigh, 2009). En effet, il correspondrait à une perte totale annuelle pour la population mondiale de 7 916 DALYs ce qui est bien loin des DALYs actuellement perdus à cause des maladies diarrhéiques (Figure 10).

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

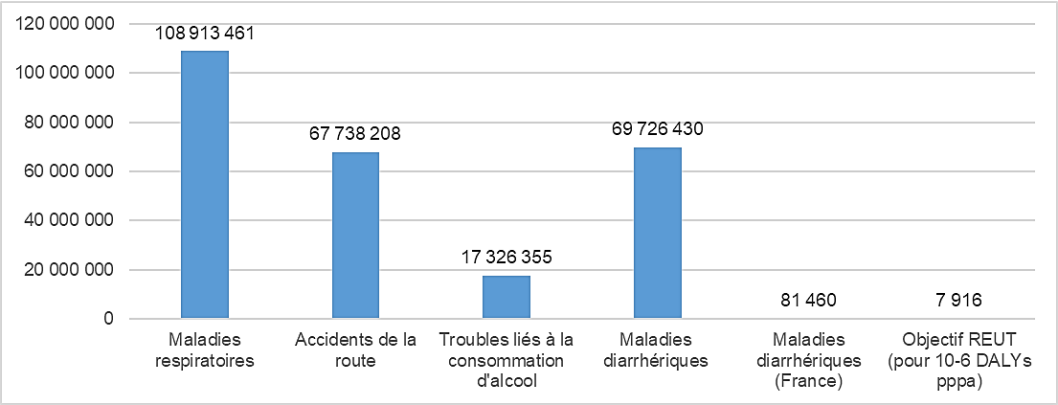


Figure 10 : Total des DALYs perdus par la population mondiale (tous âges et tous sexes confondus) selon différentes causes pour l'année 2021 (adapté des données de WHO, 2024)

- **Choix retenu pour le modèle**

L'objectif de santé de $\leq 10^{-6}$ $DALYs_{pppa}$ a été retenu pour notre modèle bien que ce soit un objectif strict. IL serait intéressant de pouvoir comparer les résultats associés aux différents objectifs envisageables.

En résumé, une fois que les $DALYs_{pppa}$ ont été estimés pour chaque population exposée et pour chaque microorganisme pathogène, leur comparaison avec l'objectif fixé par l'OMS de $\leq 10^{-6}$ $DALYs_{pppa}$ permet d'évaluer la gestion en place et si des mesures supplémentaires doivent être mises en place.

1.2.7 En conclusion, la construction d'un modèle générique et simplifié d'évaluation quantitative des risques utilisable par les acteurs du terrain

L'état de l'art nous a permis i) de sélectionner quatre micro-organismes pathogènes de référence pour notre modèle, ii) de construire différents scénarios d'exposition avec des paramètres basés sur la littérature, iii) de sélectionner des modèles dose-réponse pour chaque microorganisme pathogène de référence afin de calculer des probabilités d'infection par jour et annuelle, iv) d'identifier les ratios maladie/infection pour chaque microorganisme afin de calculer les probabilités de maladie annuelle à partir des probabilités d'infection et v) d'estimer les effets sur la santé attribuable à chaque microorganisme exprimés en $DALYs_{pppa}$. En comparant les effets calculés pour chaque population et l'objectif fixé par l'OMS, il est possible de définir si les mesures de gestion actuellement en place sont suffisantes ou si des mesures supplémentaires sont nécessaires. Ainsi, une base de données intégrant un ensemble de mesures de gestion envisageables et différentes informations (contribution à la réduction des risques, coûts économiques…) a été constituée et intégrée à notre modèle. C'est le sujet de notre prochaine partie.

La construire de ce modèle d'évaluation quantitative a mis en lumière l'absence de consensus concernant certains paramètres ainsi que le manque de données pour d'autres. L'objectif pour notre modèle n'est pas de réaliser une évaluation précise des risques mais de pouvoir utiliser notre modèle comme outil d'accompagnement des discussions, pour aborder les notions clés liées à l'évaluation et à la gestion des risques et de pouvoir explorer différents scénarios de gestion en se basant sur des données attendues comme plus objectives. Néanmoins, ces éléments sont importants à connaître car les résultats produits par le modèle sont influencés par ces éléments de même que les conclusions associées. Nous aborderons ces éléments plus en détail dans le chapitre 3.

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

1.3 Réduction des risques : construction d'une base de données sur les mesures de gestion envisageables

Pour atteindre les objectifs de gestion des risques, les directives de l'OMS et australiennes de 2006 indiquent un ensemble de mesures de gestion qui peuvent être mises en place. Une réduction log est associée à la plupart des mesures et différentes informations sont fournies (organisation de la mise en œuvre, coûts…). Ces éléments ont été repris en partie dans la norme ISO 16075-2 (2020) puis dans le RE 2020/741 et l'AF du 18/12/2023. Dans un premier temps, nous présenterons une analyse comparative des éléments fournis par les cadres normatifs. Nous verrons que les mesures envisagées et les réductions associées sont parfois différentes. Les références scientifiques ayant permis d'attribuer la réduction log aux mesures ont été pour la plupart identifiées. A partir de ces éléments, différents besoins ont été identifiés et notamment une meilleure spécification des contributions à la réduction des risques, une actualisation des données ainsi qu'une caractérisation des coûts. Les recherches sur les mesures de gestion ont donc été élargies à d'autres études scientifiques que celles mentionnées par les cadres normatifs. Cet élargissement nous a permis de mieux comprendre la contribution des mesures, d'apporter des connaissances supplémentaires et d'identifier des pistes de recherche. Une caractérisation des coûts économiques a été réalisée en collaboration avec le bureau d'étude ECOFILAE.

Cet ensemble a permis de constituer une base de données à intégrer à notre modèle d'évaluation et de gestion des risques. Cette base de données sera présentée dans un second temps en suivant les trois catégories de mesures que nous avons constituées : « Qualité » ; « Equipements professionnels » et « Pratiques d'irrigation et culturales ».

1.3.1 Construction de la base de données à partir des cadres normatifs

- **Une précision sémantique**

Pour l'OMS (2006), les mesures de gestion, également appelées « *mesures de protection* », rassemblent les « *mesures préventives pour constituer une barrière contre les dangers* ». Ces « *barrières* » comprennent : les restrictions sur les cultures, les techniques d'épandage des eaux usées, le dépérissement des agents pathogènes entre l'irrigation et la consommation des produits, la préparation des produits, la limitation de l'exposition mais aussi le traitement des eaux usées. Dans le RE et l'AF du 18/12/2023, une distinction est faite entre les « *barrières* » et les « *mesures préventives* ». Cette distinction est également retrouvée dans la communication du JRC concernant l'application du RE (Maffettone & Gawlik, 2022). Ainsi, les mesures préventives sont définies dans l'AF du 18/12/2023 comme :

« *traitements, actions ou procédures identifiées par la démarche d'évaluation permettant de gérer les risques identifiés sur les enjeux situés à proximité de la zone où sont les utilisées les eaux usées traitées (habitation à proximité, passants...)* »

Et les barrières comme :

« tout moyen, y compris les étapes physiques ou procédurales, ou les conditions d'utilisation des eaux usées traitées, qui réduit ou prévient un risque pathogène ou toxique pour l'homme ou l'animal en évitant que l'eau usée traitée n'entre en contact avec les produits à ingérer ou avec les personnes ou animaux directement exposés, ou tout autre moyen qui, notamment, réduit la concentration de substances préoccupantes ou de micro-organismes dans l'eau usée traitée ou prévient leur survie et leur concentration dans les produits à ingérer. Les barrières s'appliquent à la zone ou aux produits qui font l'objet de l'irrigation »

Cette distinction est intéressante car elle permet d'indiquer que les mesures n'ont pas toutes la même contribution à la réduction des risques et ne concernent pas les mêmes populations exposées. Elle semble

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

néanmoins assez floue. Par exemple, la mise en place d'un système en goutte à goutte contribue à réduire les risques d'exposition aux aérosols puisque ce système localise l'eau au pied de la plante. Ainsi, elle contribue à la réduction des risques pour les riverains et les passants. Elle peut donc être considérée comme une mesure *préventive*. Cependant, elle contribue également à éviter que l'eau n'entre en contact avec les produits à ingérer, c'est donc également une mesure *barrière*.

Afin de faciliter la compréhension des utilisateurs de la base de données, les termes « *barrières* », « *mesures de protection* » ou « *mesures de gestion* » ont été employés sans distinction dans la base de données pour désigner tout moyen, méthode ou action permettant de gérer les risques pathogènes sur l'ensemble de la filière, du traitement à la consommation des produits irrigués.

- **Une base de données non exhaustive et une précision des contributions à la réduction des risques associées aux mesures**

Pour chacun des cadres étudiés, un tableau présente différentes mesures barrières avec une réduction log associée et d'autres informations descriptives. Plusieurs différences ont été identifiées entre ces tableaux : mesures envisagées, réduction attribuée, informations organisationnelles… Quelques exemples sont présentés dans le Tableau 11.

	WHO, 2006		**NRMMC *et al., 2006***		**ISO 16075-2, 2020**		**RE 2020/741[1]**		**AF du 18/12/2023**	
Mesure	*Red.*	*Info.*	*Red.*	*Info.*	*Red.*	*Info.*	*Red.*	*Info.*	*Red.*	*Info.*
Goutte à goutte enterré	NI		4	*Cultures en surface*	6	*Lorsque que l'eau ne remonte pas à la surface du sol*	6	*Lorsque que l'eau ne remonte pas à la surface du sol*	6	*Lorsque que l'eau ne remonte pas à la surface du sol*
Distance vis-à-vis des zones sensibles	1	*50-100m*	1	*25- 30m*	1	*70m [2]*	NI [3]		NI [3]	
Séchage des produits finaux	NI		NI		2-4	*Cultures fourragères et autres cultures séchées au soleil et récoltées avant consommation*	2-4	*Cultures fourragères et autres cultures séchées au soleil et récoltées avant consommation*	2-4	*Fourrage frais et pâturage séchées au soleil et récoltées avant consommation*
Pelage des produits finaux	2	*Fruits, légumes racines*	2	*Avant consommation*	2	*Fruits et légumes racines*	2	*Fruits et légumes racines*	*2*	*Fruits et légumes, avant vente au consommateur*
Lavage des produits finaux	1	*Salades, légumes et fruits avec de l'eau propre*	NI		1	*Salades, légumes et fruits à l'eau potable avant vente aux consommateurs*	1	*Salades, légumes et fruits à l'eau potable avant vente aux consommateurs*	1	*Salades, légumes et fruits à l'eau potable avant vente aux consommateurs*
Cuisson des produits finaux	6-7	*Immersion dans une eau bouillante*	5-6	*Avant consommation*	6-7	*Immersion dans une eau bouillante ou cuisson à haute température*	6-7	*Immersion dans une eau bouillante ou cuisson à haute température*	NI	

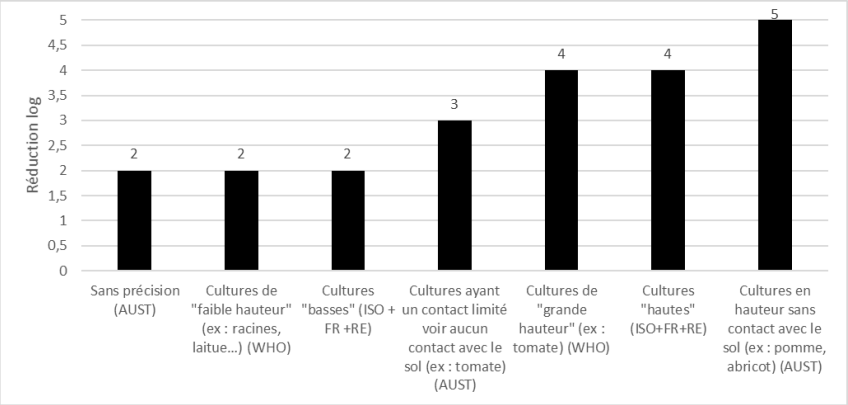
Légende : (1) information tirée du guide technique du JRC (Maffettone & Gawlik, 2022) ; (2) = pour l'arrosage des espaces verts, (3) = des distances sont proposées mais ne sont pas intégrées dans la liste des mesures barrières et aucune réduction log n'est attribuée ; Red. = réduction log associée à la mesure, info = information supplémentaire indiquée pour la mesure, NI = non intégrée dans la liste proposée

Tableau 11 : Exemples des différences identifiées pour plusieurs mesures concernant leur intégration, la réduction associée ou encore les informations fournies

Ainsi, les directives australiennes n'envisagent pas, par exemple, le lavage ou la désinfection des produits comme mesures *barrières*. La cuisson n'est pas intégrée dans l'AF du 18/12/2023. L'AF du 18/12/2023 stipule néanmoins que la liste proposée n'est pas exhaustive. Le choix a été d'intégrer l'ensemble des mesures décrites dans les différents corpus afin de proposer une base de données exhaustive.

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

Les prescriptions techniques et organisationnelles attribuées aux mesures sont également différentes, de même que les réductions logarithmiques associées. C'est le cas, par exemple, de la mise en place d'une distance entre le périmètre irrigué et les zones sensibles (habitations, chemins…). Pour une même réduction (1 log), la distance indiquée varie entre 70 m et 100 m. Concernant la cuisson, les réductions attribuées sont 5-6 pour les directives australiennes (2006) et 6-7 pour l'OMS (2006). Un autre exemple est celui du « goutte à goutte de surface » (Figure 11).



Légende : « Faible hauteur » = « juste au-dessus du sol et partiellement en contact » (WHO, 2006) ; « Basses » = « au moins 25cm au-dessus du sol » (AF du 18/12/2023), « Grande hauteur » = « partie récoltée n'est pas en contact avec le sol » (WHO, 2006), « Hautes » = « à au moins 50cm au-dessus du sol » (AF du 18/12/2023) ; AUST = NRMMC et al., 2006 ; ISO = ISO 16075-2, 2020 ; FR = AF du 18/12/2023 ; RE = RE 2020/741 et WHO = WHO, 2006.

Figure 11 : Comparaison de la réduction log et des prescriptions techniques attribuées par les cadres réglementaires pour la mesure « goutte à goutte »

Une réduction de 2 log est attribuée pour des cultures racinaires ou encore contact avec le sol pour l'OMS (2006) tandis que la norme ISO 16075-2 (2020) indique une distance minimum de 25 cm. Autre exemple, l'OMS (2006) considère la tomate comme une culture de grande hauteur et attribue une réduction de 4 log tandis que les directives australiennes (2006) la considèrent comme une culture ayant un contact limité voir sans contact et attribuent une réduction de 3 log. Ainsi, pour une même réduction attribuée, les cultures concernées ne sont pas les mêmes et pour une même culture, les réductions attribuées diffèrent.

Les cadres ne s'accordent donc pas toujours sur la contribution sanitaire des mesures barrières bien que les références scientifiques utilisées pour définir ces contributions soient les mêmes. Afin de respecter la réglementation en vigueur, les réductions log attribuées dans l'AF du 18/12/2023 ont été retenues pour la plupart des mesures barrières intégrées dans la base de données. L'analyse des références scientifiques utilisées pour définir ces contributions a montré que ces données présentent un certain nombre de limites : références antérieures aux années 2000, conditions opératoires amenant à une sur-estimation des risques… Ces limites seront détaillées dans les paragraphes consacrés à la description des différentes mesures barrières. La construction de la base de données s'est donc élargie à d'autres études scientifiques que celles indiquées par les cadres normatifs. Cela a permis d'enrichir notre base de données mais aussi d'identifier des besoins d'actualisation des contributions indiquées par les cadres et également de mener des recherches pour mieux les spécifier.

L'état de l'art, qui sera présenté dans les sections suivantes, s'est appuyé notamment sur deux rapports de stage réalisés avant le début de la thèse (Abdelhedi, 2021 ; Loudhaief, 2021). Concernant les procédés de traitement, les données retenues dans notre base de données proviennent donc des directives de l'OMS (2006) ainsi que de la littérature et en particulier des travaux de Meunier *et al.,* (2024) et (Guillaume-Ruty *et al.,* 2024). Aucune réduction n'est attribuée dans l'AF du 18/12/2023.

Il a été également nécessaire de mieux préciser la nature des contributions des mesures à la réduction des risques. En effet, dans les cadres normatifs, une « *réduction des agents pathogènes* » (ISO 16075 ; WHO 2006) ou « *réduction de l'exposition aux agents pathogènes* » (NRMMC *et al.* 2006), est attribuée sans préciser i) si la barrière agit sur les concentrations en micro-organismes, sur le volume d'exposition ou sur le risque

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

d'exposition, ii) quelles populations exposées sont concernées par la barrière ou encore iii) à quelles voies d'exposition s'applique la barrière. Par exemple, la réduction des risques apportée par la mise en place d'un goutte à goutte pourrait être moins importante pour la voie « Sol » que pour la voie « Plante » puisque les goutteurs sont situés sur le sol contrairement à la partie comestible qui peut être située en hauteur. Ces précisions ont donc été apportées pour chaque mesure autant que possible.

- **Proposition d'une classification**

Dans la norme ISO 16075-2 (2020), le RE 2020/741 et l'AF du 18/12/2023, les mesures sont classées par usages: i) irrigation des cultures vivrières et ii) irrigation des cultures fourragères et de semences. L'OMS (2006) distingue les mesures en plusieurs groupes : les restrictions sur les cultures, les techniques d'épandage des eaux usées, le dépérissement au champ, la préparation des produits, la limitation de l'exposition et le traitement. Dans ses directives sur la QMRA, qui ne concernent pas uniquement l'irrigation agricole, l'OMS propose une classification selon la nature des mesures : « technique » rassemblant les procédés de traitement, « environnementale » comme le dépérissement au champ et « réglementaire » telle que le contrôle des accès ou la mise en place de distances (WHO, 2016a). Dans la littérature, les mesures sont parfois classées par maillon du système REUT : traitement, à la parcelle, post-récolte au niveau des distributions, post-récolte au niveau des consommateurs (Amoah *et al.,* 2011).

Ces propositions sont intéressantes mais présentent quelques limites. Certaines mesures s'appliquent pour l'ensemble des cultures comme les systèmes d'irrigation, d'autres ont un effet sur le fonctionnement global plutôt que sur un maillon spécifique comme la sensibilisation ou la formation. Enfin, certaines ne sont ni technique, ni environnementale, ni réglementaire comme par exemple les préparations post-récolte. Une nouvelle classification a donc été pensée pour faciliter la compréhension des utilisateurs de la base de données (Tableau 12).

Catégorie	Explication	Exemples de mesures concernées
Qualité (Q)	Mesures contribuant à la réduction des pathogènes dans l'eau réutilisée	*Procédés de traitement secondaires et avancés, dilution…*
Equipements (E)	Mesures concernant les moyens matériels utilisés	*Port d'équipements de protection individuelle, systèmes d'irrigation, bâche de séparation…*
Pratiques culturales (P)	Mesures propres aux méthodes de conduite des cultures et de l'irrigation	*Attente d'un temps de dépérissement au champ, irrigation nocturne, préparations post-récolte…*
Fonctionnement du système (S)	Mesures qui assurent le bon fonctionnement des mesures et du système global	*Sensibilisation, formation, suivi microbiologique, entretien des équipements…*

Tableau 12 : Classification des mesures barrières utilisées dans la base de données

- **Caractérisation des impacts économiques et environnementaux**

L'OMS (2006) consacre un chapitre aux considérations économiques et financières où des valeurs chiffrées sont proposées pour les procédés de traitement. Dans le guide technique du JRC, il est indiqué que les solutions de traitement supplémentaires comme la désinfection peuvent être avoir des coûts élevés de même que les surveillances microbiologiques (Maffettone & Gawlik, 2022). Néanmoins, aucune valeur chiffrée n'est néanmoins présentée. C'est également le cas pour la norme ISO 16075-2 (2020) et l'AF du 18/12/2023. Pour les autres mesures de gestion, quelques informations qualitatives sont mentionnées par l'OMS (2006) mais aucune valeur chiffrée n'est indiquée. Par exemple, il est indiqué que des coûts peuvent être élevés pour la mise en place d'un système en goutte à goutte et que les panneaux signalant le périmètre sont une solution peu onéreuse. L'OMS (2006) reconnait pourtant que l'indication des coûts économiques est un facteur important pour le choix des mesures barrières. Ainsi, pour pouvoir construire les scénarios de gestion et les comparer, il était donc nécessaire de caractériser les coûts associés aux mesures de gestion.

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

Une estimation des coûts d'investissement et opérationnels a donc été réalisée en collaboration avec ECOFILAE, un bureau d'un bureau d'étude français spécialisé dans la mise en œuvre de projets de REUT. Ce travail a fait l'objet d'un stage, encadré dans le cadre de la thèse. L'estimation des coûts de chaque barrière n'a pas été évidente car ces coûts sont soumis à de fortes variations spatiales, temporelles et liées à l'échelle des projets, notamment pour les procédés de traitement ou les équipements d'irrigation (fluctuation de l'énergie, des coûts des matériaux, économie d'échelle...). Cependant, l'objectif poursuivi à travers cette estimation n'est pas de produire une étude financière précise mais d'avoir des ordres de grandeur pour permettre la construction collective de la gestion. Les coûts associés à certaines barrières n'ont pas pu être estimés. C'est le cas des restrictions sur les cultures, de la mise en place de distances vis-à-vis du périmètre irrigué ou encore des préparations post-récolte. Leur estimation serait nécessaire pour pouvoir pleinement comparer les impacts associés aux différents choix de gestion. En effet, la REUT est généralement caractérisée par des coûts d'investissements parfois très élevés et des coûts de fonctionnement de plus de 10% de l'investissement. Ces coûts sont liés aux réseaux de distribution mais aussi au traitement supplémentaire et aux obligations de suivi de qualité (Locqueville *et al.,* 2023). Ainsi, l'affranchissement de la mise en place d'une unité de traitement supplémentaire pourrait limiter les coûts associés à la REUT. Néanmoins, si des mesures barrières sont mises en place notamment à l'échelle d'un agriculteur comme par exemple des restrictions d'usage, il est nécessaire de pouvoir comparer les impacts économiques associés.

Pour l'OMS (2006), ces coûts économiques doivent également être mis en regard d'autres éléments comme la protection sanitaire, la moindre consommation d'eau ou encore la diminution des besoins en matière de traitement. Comme indiqué dans le rapport de la Mission Flash, la REUT est coûteuse d'un point de vue environnemental car elle nécessite de l'énergie mais aussi des additifs chimiques (Locqueville *et al.,* 2023). Comme indiqué en introduction, l'ajout de procédés traitement supplémentaires pourraient donc contribuer à l'augmentation de ces émissions et interroge plus largement l'impact environnemental de la REUT. Cette dimension n'a cependant pas pu être intégré à la base de données à ce stade compte tenu de la diversité des mesures envisagées et de la multiplicité des connaissances couvertes par les travaux de thèse. Il est cependant souhaitable qu'une réflexion sur le bilan environnemental des pratiques de REUT puisse être menée afin que ce bilan devienne un facteur clé pour la prise de décision. Ce volet pourrait être intégré dans des développements futurs du modèle. Par exemple, Carré *et al.* (2017) ont utilisé l'Analyse du cycle de vie (ACV) pour comparer différentes filières de traitement tertiaires pour atteindre la qualité A requise par l'arrêté du 02/08/2010. Leurs conclusions montrent l'importance d'intégrer cette dimension au même niveau que la dimension technique ou économique. Kalboussi *et al.* (2022) ont également utilisé l'ACV pour comparer l'utilisation d'EUT avec d'autres ressources comme les eaux de surface et les eaux souterraines.

En conclusion, l'analyse des cadres a permis d'identifier différentes mesures de gestion des risques envisageables pour la gestion des risques. Des informations sont importantes comme les prescriptions techniques et organisationnelles, les contributions à la réduction des risques associées et les impacts économiques. Ainsi, un état de l'art a été réalisé à part des cadres normatifs et de la littérature pour réaliser une caractérisation de chaque barrière en répondant dans la mesure du possible aux informations suivantes :

- **Description opérationnelle** : quel maillon ? quelles caractéristiques techniques ? quelles conditions de bon fonctionnement ? quelle organisation possible pour le fonctionnement et le partage des responsabilités ?
- **Impact sanitaire** : quelle contribution à la gestion des risques ? quelle(s) voie(s) d'exposition concernée(s) ? quelles (s) population(s) exposée(s) ? quelle réduction est atteinte ?
- **Impact économique :** quels coûts d'investissements et coûts opérationnels par an et sur 20 ans ?

Ces éléments sont présentés dans les sections suivantes en suivant la classification proposée dans notre base de données. Un résumé de la base de données est présenté dans le Tableau 13.

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

Maillon	Mesure barrière	Contribution			Voie d'exposition					Populations exposées							Réduction logarithmique					Coûts				
		EXP	CC	VOL	EAU	AIR	PLT	SOL	PROD	PT	PI	PE	PR	RIV	PASS	CONS	BACT	VIRUS	PROT	HELM	Ref	UNITE	CPX	UNIT	OPX	Ref
Procédés de traitement secondaire	*LG*		x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	6	4	4	3	*1*	-	-	€/m³	1,49 à 3,22	*6*
	FPR		x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	3	2	1	3	*1*	-	-	€/m³		
	CF		x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	2	2	1	2	*1*	-	-	€/m³		
	BA		x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	2	2	1	2	*1*	-	-	€/m³		
	BRM		x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	5,5	4	6	3	*1,2*	-	-	€/m³		
Procédés de traitement avancé	*LM*		x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	2	1,8	3	1	*3,4*	€/m³	NE	€/m³	0,02 à 0,13	*7*
	UV		x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	4	3	3	0	*1,5*	€/m³	1,17 à 3,12	€/m³	0,03 à 0,24	
	Cl		x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	6	3	1,5	0	*1*	€/m³	1,16 à 3,00	€/m³	0,01 à 0,02	
	UV + Cl		x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	10	6	3,5	0	*(i)*	€/m³	1,21 à 3,32	€/m³	0,04 à 0,26	
	FS + EOx		x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	9	5	4	3	*(i)*	€/m³	4,60	€/m³	0,56	
	FS + UV		x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	7	6	5	3	*(i)*	€/m³	1,80 à 3,80	€/m³	0,14 à 0,48	
	FS + UV + Cl		x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	13	9	6,5	3	*(i)*	€/m³	1,90 à 4,00	€/m³	0,15 à 0,50	
	MF + EOx		x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	8,5	5	4	3	*(i)*	€/m³	5,40	€/m³	0,64	
	MF + UV		x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	6,5	6	5	3	*(i)*	€/m³	1,30 à 4,20	€/m³	0,07 à 0,52	
	MF + UV + Cl		x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	12,5	9	6,5	3	*(i)*	€/m³	1,30 - 4,40	€/m³	0,07 à 0,54	
	UF + UV		x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	10	9	8	6	*(i)*	€/m³	1,40 - 5,20	€/m³	0,08 à 0,60	
	UF + UV + Cl		x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	16	12	9,5	6	*(i)*	€/m³	1,50 - 5,40	€/m³	0,09 à 0,60	
Distribution	*Dilution*		*(ii)*		*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*		*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	*1*	-	NE	-	NE	
	Stockage		*(ii)*		*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*		*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	-	€/m³	15	€/m³	0,45	*7*
	Signalisation du réseau de distribution	*(ii)*		*(ii)*	*(ii)*					*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*		*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	*8*	€/ unité	30	€/ unité	30	*7*

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

Maillon	Mesure barrière	Contribution			Voie d'exposition					Populations exposées							Réduction logarithmique					Coûts				
		EXP	CC	VOL	EAU	AIR	PLT	SOL	PROD	PT	PI	PE	PR	RIV	PAS	CONS	BACT	VIRUS	PROT	HELM	Ref	UNITE	CPX	UNIT	OPX	Ref
Irrigation	*Choix des cultures – non alimentaires*	x							x							x	-	-	-	-		-	NE	-	NE	
	Irrigation automatique	x			x	x					x						-	-	-	-	*5*	-	-	-	-	-
	Irrigation localisée – micro-aspersion	x		x	x	x	x	x	x			x	x	x	x	x	1 à 4	1 à 4	1 à 4	1 à 4	*1,8, 9*	€/ha	8,200	€/ha	164	*7*
	Irrigation localisée – goutte à goutte de surface	x		x	x	x	x	x	x			x	x	x	x	x	2 à 4	2 à 4	2 à 4	2 à 4	*9*	€/ha	8,100	€/ha	42	*7*
	Irrigation localisée – goutte à goutte enterré	x		x	x	x	x	x	x			x	x	x	x	x	6	6	6	6	*9*	€/ha	7,933	€/ha	68	*7*
	Calendrier d'irrigation – irrigation nocturne	x			x	x								x	x		-	-	-	-	*5*	-	NE	-	NE	
	Calendrier d'irrigation – Arrêt en cas de fort vent	x		x	x	x								x	x		-	-	-	-	*5*	€/ unité	200	-	NE	
	Zone tampon (70m)			x	x	x								x	x		1	1	1	1	*9*	-	NE	-	NE	-
	Bâche de séparation			x			x		x			x	x			x	2 à 4	2 à 4	2 à 4	2 à 4	*9*	€/ha	1,500	-	-	*7*
	Signalisation du périmètre irrigué	*(ii)*			*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*						*(ii)*		*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*		€/ unité	30	€/ unité	30	*7*
	Contrôle de l'accès (permanent)	x			x	x									x		-	-	-	-	*8*	€/mL	50	-	NE	
	Contrôle de l'accès (temporaire)	x			x	x	x	x			x	x	x		x		1*	0,5*	0,5*	0,5*	*8*	-	NE	-	NE	
	Ecrans de protection	*(ii)*		*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*								*(ii)*	*(ii)*		*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	*8*	-	NE	-	NE	
	Finalisation avec d'autres sources		*(ii)*		*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*		*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	*1*	-	NE	-	NE	

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

Maillon	Mesure barrière	Contribution			Voie d'exposition					Populations exposées							Réduction logarithmique					Coûts				
		EXP	CC	VOL	EAU	AIR	PLT	SOL	PROD	PT	PI	PE	PR	RIV	PAS	CONS	BACT	VIRUS	PROT	HELM	Ref	UNITE	CPX	UNIT	OPX	Ref
Post irrigation	Inactivation naturelle après la dernière irrigation		x				x	x	x			x	x			x	1*	0,5*	0,5*	0,5*	*1*	-	NE	-	NE	
	Entretien mécanisé	*(ii)*					*(ii)*	*(ii)*				*(ii)*	*(ii)*				-	-	-	-	*7*	-	NE	-	NE	
	Récolte mécanisée	*(ii)*					*(ii)*	*(ii)*				*(ii)*	*(ii)*				-	-	-	-	*7*	-	NE	-	NE	
Post-récolte	Transformation		x						x							x	6	6	6	6	*1,9*	-	NE	-	NE	
	Cuisson		x						x							x	6	6	6	6	*1,9*	-	NE	-	NE	
	Séchage		x						x							x	2	2	2	2	*9*	-	NE	-	NE	
	Pelage		x						x							x	2	2	2	2	*1*	-	NE	-	NE	
	Désinfection		x						x							x	2	2	2	2	*1, 10*	-	NE	-	NE	
	Lavage à l'eau potable		x						x							x	1	1	1	1	*1, 10*	-	NE	-	NE	
Global	EPI	*(ii)*		*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*		*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*				*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	*1*	€/ unité	8 à 30	-	-	*7*
	Entretien des équipements		*(ii)*		*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	*1,8,*	-	NE	-	NE	
	Sensibilisation des non-professionnels	*(ii)*		*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*					*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	*1*	-	NE	-	NE	
	Formation des professionnels	*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*				*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	1,8, 10	-	NE	-	NE	
	Suivi médical									*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*				-	-	-	-	1,8, 10	-	NE	-	NE	
	Suivi microbio-logique		*(ii)*		*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	-	-	-	-	1,8, 10	€/éch	8-240	-	-	*4*
	Système de communication et d'alerte	*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	*(ii)*	-	-	-	-	1	-	NE	-	NE	

*Légende : * = par jour ; (i) = addition des reductions log ; (ii) = à décider avec les utilisateurs de l'outil ; en bleu = barrières « Qualité », en jaune = barrières « Equipements », en vert = barrières « Pratiques d'irrigation et culturales ; en gris = barrières « Fonctionnement du système global » ; 1 = WHO 2006 ; 2 = Mailler et al. 2020 ; 3 = Verbyla et al. 2017 ; 4 = données de Clermont-Ferrand (2022-2023) ; 5 = Anses, 2012a ; 6 = Duquesne, J. and Portela, S. ; 2024 ; 7= ECOFILAE, Leseur, 2023 ou dires d'expert ; 8 = NRMMC et al. 2006 ; 9 = ISO 16075-2 :2020 ; 10 = RE 2020/741 ; AIR = ingestion d'aérosols ; BACT = bactéries ; CC = réduction de la concentration ; CONS = consommateurs ; CPX = coûts d'investissement ; Eau = ingestion directe de gouttelettes d'eau ; Eox = Electro-oxydation ; EXP = réduction de l'exposition ; HELM = helminthes ; NE = non estimé ; OPX = coûts opérationnels ; PAS = Passants ; PI = personnels en charge de l'irrigation ; PE = personnel en charge de l'entretien des cultures ; PLT = ingestion indirecte après contact avec la plante ; PR = personnel en charge de la récolte ; PROD = ingestion de produits finaux ; PROT = protozoaires ; PT = professionnels en charge du traitement avancé et du réseau de distribution ; RIV = riverains ; SOIL = ingestion indirecte après contact avec le sol ; UV = désinfection ultraviolet ; VIRUS = virus ; VOL = réduction du volume.*

Tableau 13 : Mesures de gestion retenues dans la base de données, contribution sanitaire et coûts associés

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

1.3.2 Amélioration de la qualité des EUT (Q)

Les études épidémiologiques ont montré que les risques d'infections/maladies individuelles et les flambées épidémiques liées à la consommation des végétaux irrigués avec des eaux usées survenaient généralement à cause de l'utilisation d'eaux usées brutes ou partiellement traitées (WHO, 2006 ; Dickin *et al.,* 2016 ; Adegoke *et al.,* 2018). Ainsi, l'interdiction d'utiliser les eaux usées sans traitement est une des premières mesures intégrées dans les cadres normatifs. La qualité des eaux usées réutilisées est généralement un élément central de la gestion des risques. Dans cette section, nous allons voir les différentes mesures contribuant à réduire la concentration en micro-organismes pathogènes dans les eaux usées.

1.3.2.1 Procédés de traitement des eaux usées

Les obligations réglementaires de traiter les eaux usées, comme par exemple la *Directive européenne relative au traitement des eaux résiduaires domestiques* (DERU n°91/271/CEE), ont largement contribué au développement des procédés de traitement primaire et secondaire. C'est le cas notamment des pays à revenu élevé comme la France. Avec le développement de la REUT mais aussi l'émergence de problématiques telles que celles liées aux micropolluants organiques (pesticides, résidus médicamenteux…), de nouveaux procédés ont émergé : les procédés de traitement tertiaires ou procédés avancés (de Boer *et al.,* 2022).

Dans les directives pour la REUT de l'OMS (2006), de l'Australie (*NRMMC et al.,* 2006) mais aussi de l'US-EPA (2012), une description détaillée des procédés de traitement envisageables est réalisée. Nous présenterons dans cette section la liste des procédés retenus pour notre base de données, les contributions à la réduction des concentrations en micro-organismes associées ainsi que les coûts économiques. Nous ne présenterons pas le fonctionnement technique de ces procédés. La littérature est largement abondante sur le sujet (Licciardello *et al.,* 2018 ; Rizzo *et al.,* 2020 ; de Boer *et al.,* 2022, Guillaume-Ruty *et al.,* 2024).

i. Sélection des procédés de traitement

- **Recommandations des cadres normatifs et choix identifiés dans la littérature**

Dans les directives de l'OMS (2006), les trois catégories de traitement (primaires, secondaires et tertiaires) sont décrites de manière distincte. Des procédés pour chaque catégorie sont proposés. Dans les directives australiennes (2006), de l'US-EPA (2012) et dans la norme ISO 16075-2 (2020), les procédés primaires et secondaires ne sont pas distingués et une réduction générale est attribuée pour l'ensemble des procédés secondaires. Dans notre base de données, les traitements primaires n'ont pas été spécifiés car leur contribution est généralement faible sur les bactéries, les virus et les protozoaires (<1 log) (NRMMC *et al.* 2006). La distinction proposée par l'OMS (2006) peut s'expliquer par la contribution intéressante des procédés primaires pour la réduction des œufs d'helminthes (jusqu'à 2 log). De plus, ce sont des procédés facilement mobilisables présentant des intérêts pour les pays à faible revenu. Néanmoins, nous avons choisi de spécifier les procédés de traitement secondaire tel que le propose l'OMS (2006). En effet, comme nous allons le voir dans la section suivante, certains procédés extensifs comme le lagunage (filière complète) ont des capacités d'abattement supérieures à d'autres procédés secondaires.

Une large gamme de procédés de traitement est envisageable. La liste des procédés secondaires et tertiaires a été constituée à partir des sources suivantes : i) des procédés validés par l'OMS et les autres cadres réglementaires, ii) du panorama EPNAC présentant un état des lieux de la REUT en France

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

(Lombard-Latune & Bruyère, 2023) et iii) des combinaisons de procédés les plus souvent rencontrés sur le terrain (dires d'experts). En France, le lagunage (filière complète ou lagunage de maturation en aval d'un traitement secondaire) est le procédé de traitement tertiaire le plus utilisé en France, suivi de la désinfection UV et de la chloration (Lombard-Latune & Bruyère, 2023) (Figure 12).

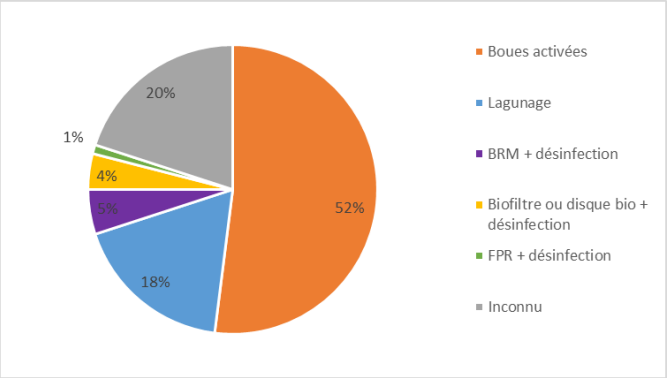


Figure 12 : Procédés de traitement mobilisés dans les projets recensés par l'état de lieux de la REUT réalisé en 2022 (Lombard-Latune & Bruyère, 2023)

- **Choix retenu pour le modèle**

L'ensemble des procédés retenus dans notre base de données sont présentés dans le Tableau 14.

Catégorie		Procédés retenus
Procédés secondaires	Extensif	*Lagunage (LG), Filtres plantés de roseaux (FPR)*
	Intensif	*Cultures fixées (CF), Boues activées (BA), Bioréacteur à membrane (BRM)*
Procédés avancés	Filtration	*Filtre à sable (FS), Microfiltration (MF), Ultrafiltration (UF)*
	Désinfection	*Ultraviolet (UV), Chloration (CL), Electro-oxydation (EOx)*
	Autres	*Lagune de maturation (LM)*

Tableau 14 : Procédés de traitement secondaires et tertiaires retenus

Concernant les procédés secondaires, les lits bactériens, disques biologiques et biofiltres ont été regroupés sous la catégorie « cultures fixées » car les données d'abattement retrouvées dans la littérature sont peu nombreuses et leur fonctionnement est relativement similaire. Dans les directives de l'OMS (2006) et australiennes (2006), les procédés membranaires (micro, ultra et nano-filtration) sont regroupés sous une même catégorie appelée « membranes ». Nous avons fait le choix de distinguer la microfiltration et l'ultrafiltration dans notre modèle. En effet, Carré (2017) indique que les abattements varient d'au moins 2 log entre ces procédés. Les procédés avancés fonctionnent généralement en association, des combinaisons ont donc été proposées. Elles seront présentées dans la section consacrée aux coûts économiques. Certains procédés avancés n'ont pas été intégrés comme l'ozonation (WHO, 2006 ; Anses, 2012a) ou les procédés d'oxydation avancés (US-EPA, 2012). En effet, ils concernent généralement d'autres usages de REUT comme la production d'eau potable ou la gestion d'autres risques (micropolluants…).

- **Besoins identifiés et évolutions possibles du modèle**

Les procédés retenus dans notre modèle sont assez généralistes. Certains procédés pourraient être mieux spécifiés. Par exemple, l'OMS (2006) intègre également le lagunage aéré. Les directives australiennes (2006) distinguent les FPR horizontaux et verticaux. Les abattements indiqués dans la littérature pour ces procédés étant différents, ces spécifications seraient donc à envisager. D'autres

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

procédés pourraient également être intégrés en cas d'élargissement du modèle à d'autres usages de REUT.

ii. Contribution à la réduction des risques

- **Recommandations des cadres normatifs et choix identifiés dans la littérature**

Pour chaque procédé, l'OMS (2006) associe une plage de réduction log pour chacun des 4 types de micro-organismes pathogènes (bactéries, virus, protozoaires et helminthes). En effet, pour un même procédé de traitement, les performances ne sont pas forcément homogènes d'un type de microorganisme à l'autre, comme le montre les valeurs retenues par l'OMS (2006) mais aussi dans la littérature. Il y a donc un intérêt à évaluer les risques associés à chaque type de microorganisme et non pas uniquement la bactérie *E.coli*, comme ce qui est requis dans le RE 2020/741 (Dingemans *et al.,* 2020).

Les directives australiennes (2006) et de l'US-EPA (2012) sont encore plus précises que les directives de l'OMS (2006). Les abattements sont spécifiés pour différents indicateurs de contamination fécale (*E.coli, Clostridium perfringens…*) mais aussi pour différents micro-organismes pathogènes (Campylobacter, *Cryptosporidium parvum…*). En effet, les réductions log peuvent être différentes entre les indicateurs choisis et les micro-organismes pathogènes qu'ils représentent. Par exemple, *Clostridium perfringens* est une famille de bactéries dont les spores sont utilisées comme indicateurs de suivi des kystes de protozoaires (dont Cryptosporidium est un genre). La chloration contribue à une réduction de 1 à 2 log pour *Clostridium perfringens* contre 0 à 0,5 log pour *Cryptosporidium parvum* (NRMMC *et al.* 2006 ; US-EPA, 2012). De plus, les performances de traitements ne sont pas non plus homogènes entre les familles de micro-organismes d'un même type. Par exemple, les adénovirus sont particulièrement résistants aux UV par rapport aux autres virus (Anses, 2012a ; Carré, 2017). Il existe donc un certain nombre de limites liées aux indicateurs de contamination fécale généralement utilisés pour le suivi. Il y a donc un intérêt à considérer plusieurs familles ou espèces de micro-organismes pour un même type.

Les conditions opératoires des procédés (temps de rétention et conditions environnementales pour les lagunes, puissance des lampes pour les UV, concentration pour la chloration…) influencent les réductions log atteintes. Par exemple, une dose inférieure à 10 mJ/cm^2 sera suffisante pour atteindre une réduction de 4 log en *E.coli* tandis qu'il faudra une puissance supérieure à 30 mJ/cm^2 pour atteindre cette même réduction pour les rotavirus voir plus de 180 mJ/cm^2 pour les adénovirus (Carré *et al.* 2017). Adapter la dose est donc important pour assurer une réduction suffisante des micro-organismes pathogènes et également limiter la re-croissance après le traitement. Certains cadres fournissent des informations quant aux conditions opératoires. Pour la chloration, la norme ISO 16075-2 (2020) indique qu'une concentration résiduelle en chlore total inférieure à 1 mg/L permet d'atteindre 2 log de réduction après 30 min et qu'une concentration supérieure à 1 mg/L permet d'atteindre 4 log.

- **Choix retenu pour le modèle**

Par souci de simplification des informations fournies aux utilisateurs, le détail des performances de réduction log obtenues reste à l'échelle des types de micro-organismes (bactéries, virus, protozoaires, helminthes). La question de spécifier selon les indicateurs ou les micro-organismes pathogènes voir même à un degré plus poussé (famille, genre ou espèce) pourra se poser pour une évolution future. Les valeurs indiquées par l'OMS (2006) ont été retenues dans la base de données. Bien que la plupart des références utilisées datent des années 80-90, la méthodologie et les résultats ont été validées par un consensus de spécialistes du sujet. Néanmoins, certaines données de l'OMS (2006) sont imprécises ou parfois absentes. C'est le cas, par exemple, du lagunage de maturation. Les abattements fournis

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

par l'Anses (2012a), par la littérature ainsi que des données provenant de cas de REUT existants (Clermont-Ferrand) ont alors été utilisées. Les valeurs retenues correspondent à la valeur haute de la plage indiquée par les différentes références utilisées. C'est un élément important à connaître pour l'utilisation de la base de données avec les acteurs opérationnels. En effet, en utilisant ces valeurs, nous considérons que les ouvrages de traitement sont conçus selon les règles de l'art, qu'ils fonctionnent en conditions optimales et qu'ils sont correctement exploités. L'utilisation de données réelles serait préférable. En effet, certains auteurs ont montré qu'en conditions opérationnelles, les réductions atteintes pouvaient être inférieures à la plage indiquée par l'OMS (Oakley *et al.,* 2019). Comme l'indique l'US-EPA (2012), les abattements sont donnés à titre comparatif. Les réductions log indiquées dans la base de données pourront être adaptées aux données du terrain lors de l'utilisation du modèle.

Pour obtenir la réduction totale des combinaisons des procédés de traitement avancés et plus largement de la filière de traitement, les abattements de chaque procédé ont été additionnés. Les données sont résumées sur la Figure 13 ainsi que dans le Tableau 13 présenté précédemment.

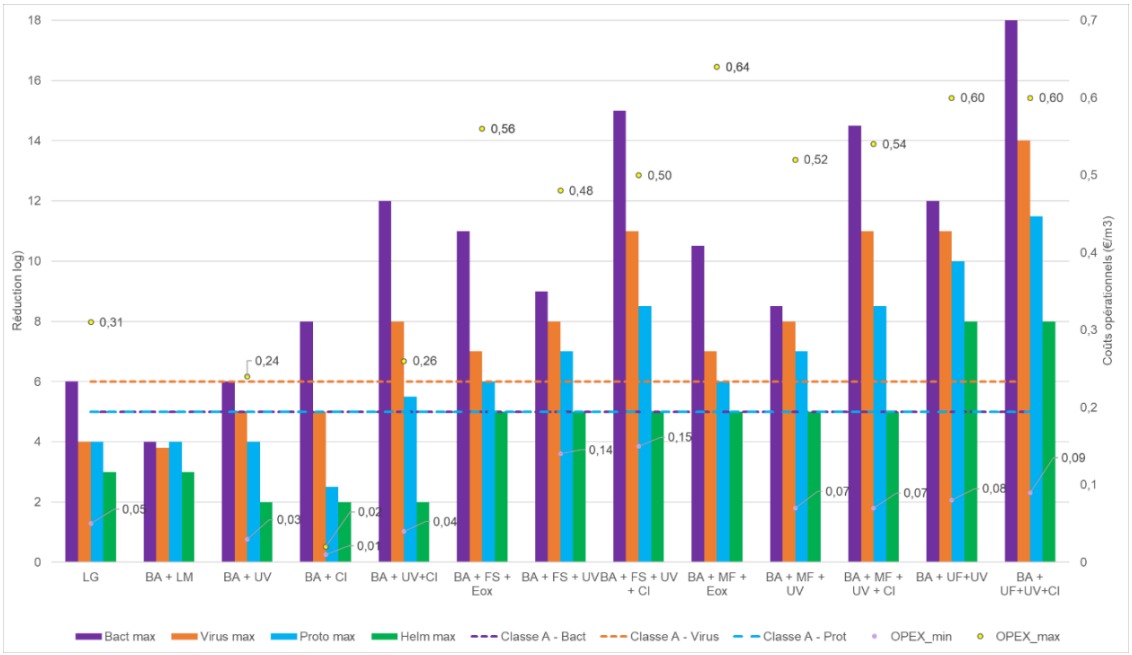


Figure 13 : Réduction logarithmique fixe retenue (log) et coûts d'investissement (€/m³) et opérationnels (€/m³) associés pour certains procédés de traitement secondaire et tertiaire

Les conditions opérationnelles n'ont pas été spécifiées dans notre modèle mais il pourrait être intéressant de pouvoir les intégrer. Cela permettrait d'estimer plus précisément la contribution des procédés de traitement pour la REUT agricole mais aussi optimiser les conditions de fonctionnement. Un aspect non-négligeable compte tenu des coûts associés aux procédés de traitement supplémentaire comme nous allons le voir dans la prochaine section.

iii. Considérations économiques (coûts d'investissements et opérationnels)

Les coûts d'investissement liés au traitement secondaire n'ont pas été estimés car la mise en place de ces procédés n'est pas une obligation directement liée à la REUT. Cependant, il est possible qu'une unité de traitement avancé soit mis en place au niveau de la STEP. Des économies d'échelle peuvent alors être réalisées par rapport à la mise en place des procédés à l'échelle de la parcelle. Il semblait

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

donc intéressant de pouvoir avoir un ordre de grandeur de ces coûts pour évaluer les coûts que représenteraient l'ajout d'une unité de traitement supplémentaire. Les coûts opérationnels (€/m^3) associés au traitement secondaire ont donc été estimés de manière globale en se basant sur les prix du service de l'assainissement collectif en France identifiés par l'Observatoire des services publics d'eau et d'assainissement (Duquesne & Portela, 2024) et les dires d'expert (STEP de Clermont-Ferrand, unité de recherche INRAE - REVERSAAL). Les coûts opérationnels ont été estimés entre 1,49 et 3,22€/m^3. Nous avons retenu la valeur fixe de 1,64€/m^3 dans notre modèle en nous basant sur les données de Clermont-Ferrand.

Les coûts d'investissements et opérationnels des procédés de traitement avancés ont été estimés en collaboration avec le bureau d'étude ECOFILAE. Ces procédés fonctionnant généralement en association, les coûts ont été estimés par combinaison. Les coûts d'investissement (CAPEX) et opérationnels (OPEX) ont été estimés selon quatre échelles correspond à différents volumes traités par an (m^3/an) (Tableau 15).

Echelle	Volume approximatif traité (m^3/an)	Débit approximatif (m^3/h)	Indication d'échelle
1	25 000	2	Un agriculteur
2	50 000	6	Quelques agriculteurs
3	175 000	20	STEP < 2000EH, plusieurs agriculteurs
4	500 000	60	STEP > 2000 EH, plusieurs agriculteurs

Tableau 15 : Echelles utilisées dans le modèle pour la mise en place des procédés de traitement

En effet, les coûts varient en fonction des volumes traités. Selon l'INEC (2018), la décentralisation des unités de traitement permettrait le développement d'unités de traitement moins coûteuses et répondant plus précisément aux besoins. Il pourrait donc être intéressant de développer des unités de traitement à l'échelle de plusieurs agriculteurs. Il était donc intéressant de pouvoir comparer les coûts associés aux différentes échelles. Néanmoins, toutes les échelles ne sont pertinentes pour chaque combinaison ou procédé compte tenu des contraintes d'exploitations et des coûts que pourraient engendrer le traitement de certains volumes. L'objectif était de fournir un nombre restreint de combinaisons afin de faciliter la construction des scénarios tout en étant représentatif. Certaines combinaisons n'ont pas donc pas été estimées (Tableau 16).

	Désinfection	Eox				UV				CL				UV + CL			
		E1	*E2*	*E3*	*E4*	*E1*	*E2*	*E3*	*E4*	*E1*	*E2*	*E3*	*E4*	*E1*	*E2*	*E3*	*E4*
Filtration	FS																
	MF																
	UF																
	Techno seule																

Légende : en vert = combinaison envisageable pour laquelle les coûts ont été estimés ; en noir = combinaison non retenue

Tableau 16 : Combinaisons de procédés tertiaires retenues pour la base de données

Les valeurs finales sont indiquées dans le Tableau 13 présenté précédemment (p.70). Les CAPEX intègrent différents éléments comme le génie civil, les travaux de maîtrise d'œuvre, les équipements ou encore le matériel électrique. Les OPEX intègrent la main d'œuvre, le renouvellement ou encore l'énergie. Comme mentionné précédemment, les coûts sont à titre indicatif. Ils peuvent fortement varier en conditions réelles. L'objectif était de pouvoir proposer des ordres de grandeur à titre indicatif afin d'appuyer le processus de décision. Une étude financière sera à réaliser pour une évaluation plus précise des coûts.

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

1.3.2.2 Stockage

Selon le panorama EPNAC, un stockage est présent dans 95% des cas recensés pour l'irrigation agricole (Lombard-Latune & Bruyère, 2023). Il permet d'assurer un tampon hydraulique entre la production des eaux usés traitées et l'usage (ISO 16075-2, 2020). Dans certains cas, le stockage peut également être considéré comme un traitement supplémentaire. En effet, la littérature indique des réductions de 1 à 6 log pour les bactéries, 1 à 4 log pour les virus, 1 à 4 log pour les protozoaires et 1 à 3 log pour les helminthes (Anses, 2012a ; US-EPA, 2012). Le RE 2020/741 reconnait le stockage comme une barrière potentielle pour améliorer la concentration ou gérer les défaillances potentiellement du traitement. Cependant, il indique également que c'est une source de risques supplémentaires. Une re-croissance des micro-organismes pathogènes peut avoir lieu. Les eaux stockées peuvent également être contaminées par des facteurs extérieurs (animaux…). La contribution du stockage pour améliorer la qualité de l'EUT varie selon plusieurs facteurs : profondeur, temps de séjour, qualité de l'eau entrante, conception (ouvert/fermé), variations saisonnières (température, UV)…(Eme & Molle, 2014 ; Maffettone & Gawlik, 2022). Par exemple, une baisse importante de la concentration en micro-organismes pathogènes a été observée pour des conditions de stockage peu profond sur la plateforme expérimentale du projet RUR'EAUX[5].

Compte tenu des incertitudes associées à la contribution du stockage pour améliorer la qualité des EUT, cette mesure n'a pas été intégrée comme une mesure « *Qualité* » dans notre base de données. Cependant, elle a été intégrée à la base de données comme une mesure « *Equipements* » puisqu'elle est intiment liée aux procédés de traitement avancés pour assurer une balance hydraulique. Les coûts associés ne doivent pas être négligés. Des travaux sont à mener pour mieux caractériser la contribution de cette mesure.

1.3.2.3 Autres mesures

- **Dilution**

La dilution consiste à mélanger des eaux issues du traitement secondaire ou avancé avec d'autres types d'eau comme les eaux conventionnelles (eaux de surface, eau potable…). Cette pratique peut avoir différentes utilités :

- améliorer la qualité agronomique des eaux en réduisant la salinité, la concentration en certains éléments comme les chlorures (NRMMC *et al.,* 2006 ; US-EPA, 2012 ; Maffettone and Gawlik, 2022) ;
- compléter quantitativement les eaux de REUT par des eaux conventionnelles et vice versa (production indirecte d'eau potable par exemple) ;
- réduire la concentration en micro-organismes pathogènes et améliorer la qualité de l'eau (WHO, 2006 ; Drechsel *et al.,* 2011 ; OMS, 2015 ; Faour-Klingbeil *et al.*, 2023).

Néanmoins, des taux de dilution élevés sont nécessaires pour atteindre 1 log de réduction (OMS, 2015). La littérature est peu abondante sur le sujet bien que quelques exemples dans les pays du sud soient mentionnés (Drechsel *et al.,* 2011). Lors de la consultation sur les deux projets d'arrêté ministériel pour modifier les dispositions de l'arrêté du 2 août 2010[6], plusieurs contributeurs ont cependant indiqué un besoin de précision concernant le mélange d'eaux d'origines différentes. Le nouvel arrêté du 18 décembre 2023 n'apporte cependant aucune information à ce sujet et les

[5] *Plateforme de démonstration expérimentale située dans l'Hérault visant à tester et valider différentes technologies de traitement et de stockage et d'irrigation pour la REUT*

[6] https://www.consultations-publiques.developpement-durable.gouv.fr/projet-d-arrete-relatif-aux-conditions-de-a2861.html

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

directives de l'OMS (2006) sont assez vagues. Cette mesure n'a donc pas été retenue. Cependant, cette question sera à étudier, notamment dans un contexte de développement d'autres usages et de la récupération d'autres eaux non conventionnelles comme les eaux pluviales.

- **Réduction de la concentration en amont**

Les directives australiennes encouragent également des mesures en amont du traitement comme la protection des ERU contre d'éventuels rejets présentant des risques sanitaires. L'arrêté du 18 décembre 2023 stipule, dans son article 1, que les eaux usées traitées issues de certaines installations sont exclues comme celles reliée à un établissement de collecte, d'entreposage, de manipulation après collecte ou de transformation des sous-produits animaux » ou alors des « *installations relevant de la nomenclature annexée à l'article R 511-9 du code de l'environnement* ». Cette mesure n'a pas été intégrée car elle concerne plutôt les risques chimiques ou liés à d'autres polluants comme les métaux lourds mais serait à intégrer pour une évaluation plus complète des risques sanitaires.

1.3.3 Contribution des équipements professionnels (E)

Comme nous allons le voir dans cette section, les équipements jouent un rôle clé dans la gestion des risques sanitaires.

1.3.3.1 Choix des systèmes d'irrigation

i. Irrigation par aspersion et micro-aspersion

- **Recommandations des cadres normatifs et choix identifiés dans la littérature**

L'irrigation par aspersion est une des systèmes d'irrigation les plus utilisées dans le monde. Selon les données du MTE, ce système représentait 87% des surfaces irriguées en France en 2020 (Pages & Parisse, 2024). Les études épidémiologiques ont montré que les risques d'exposition sont plus élevés pour ces systèmes d'irrigation que pour d'autres systèmes (goutte à goutte par exemple). En effet, l'aspersion permet de fournir l'eau au-dessus des cultures sous forme d'une pluie homogène. Les risques de contamination des parties comestibles sont donc plus probables qu'avec des systèmes localisés. Ces systèmes produisent également des aérosols. Les risques de dispersion des micro-organismes pathogènes dans l'air sont également plus élevés. Les risques associés peuvent donc être importants pour le consommateur mais aussi pour les communautés vivant ou circulant à proximité du périmètre (WHO, 2006).

L'OMS (2006) et les directives australiennes (2006) considèrent que l'utilisation de systèmes d'irrigation par micro-aspersion ou en couverture intégrale contribue à une réduction des risques de 1 log. L'AF du 18/12/2023 définit la micro-aspersion comme « *une aspersion avec une pression strictement inférieure à 3,5 bars et un débit strictement inférieur à 200L/h* » et l'intègre dans les systèmes d'irrigation localisée qui sont des techniques *« permettant d'apporter de l'eau sur une part réduire de la surface du sol* ». Le rayon de projection pour ce système est généralement de l'ordre de quelques mètres (Molle *et al.,* 2009). La couverture intégrale a un rayon de projection plus élevé que la micro-aspersion. Néanmoins, elle fonctionne généralement à plus faible pression que les systèmes d'aspersion (enrouleur, pivot…). La hauteur du jet est également plus faible. Ces éléments peuvent expliquer leur contribution à la réduction des risques contrairement à des systèmes d'irrigation comme les canons-enrouleurs ou pivots-rampes. La première version des directives australiennes publiées en 2005 est citée par les directives comme référence pour l'attribution de la réduction de 1 log. Cette

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

version n'ayant pas été retrouvée, la référence scientifique ayant permis de définir cette réduction n'a donc pas pu être identifiée. L'utilisation de ces systèmes d'irrigation pour réduire les risques est également considérée dans les autres cadres normatifs. Ainsi, la norme ISO 16075-2 (2020) considère que « l'irrigation par arroseurs et micro-asperseurs » contribue à une « réduction des agents pathogènes » de 2 log pour les « cultures basses », c'est à dire « à au moins 25 cm du jet d'eau » et 4 log pour « les arbres fruitiers à au moins 50 cm du jet d'eau ». Dans la norme ISO, l'aspersion et la micro-aspersion ne semblent pas distinguées. Une réduction des risques est accordée selon la distance entre le système et les cultures. La référence n'a également pas été retrouvée. Ces valeurs sont reprises par le RE 2020/741 mais pas dans l'AF du 18/12/2023. Il est toutefois indiqué dans l'AF du 18/12/2023 que la micro-aspersion est un système qui peut être utilisé pour une culture sous serre contrairement à l'aspersion. Une contribution à la réduction des risques est donc considérée pour ce système. Dans ce cas, l'entrée est interdite au cours de l'irrigation et une heure après. La justification de cette interdiction peut être interrogée en particulier si des EUT de qualité A ou B sont utilisées. Elle interroge également sur le message alors apporté concernant les risques associés à la REUT. Il semblerait intéressant de pouvoir évaluer les risques pour les professionnels associés à l'utilisation de la micro-aspersion dans les serres en considérant la qualité des EUT utilisée. Il serait également intéressant de pouvoir également comparer avec des cas où d'autres ressources sont utilisées comme les eaux de surface. Compte tenu de l'absence dans notre modèle de la voie « inhalation », cette évaluation n'a pas pu être faite mais elle semble être une piste de recherche intéressante.

Dans son étude de 2012 pour évaluer les risques associés à l'aspersion d'EUT, l'Anses se base sur les travaux de Molle *et al.* (2009). Ces auteurs ont caractérisé les risques de dérive et d'évaporation d'une gamme d'asperseurs d'irrigation. Ils ont montré que les systèmes par aspersion ont des débits et des portées bien supérieurs aux systèmes par micro-aspersion : 35 m^3/h avec une portée de 42 m pour le canon contre 0,087 m^3/h avec une portée de 3,8 m pour le micro-asperseur. Les asperseurs utilisés en couverture intégrale ont également des débits inférieurs (1,53 m^3/h) avec une portée de 13,5 m. Les risques de dispersion en aspersion peuvent donc toucher une plus large zone qu'avec des systèmes à plus faible pression et/ou localisés. La proportion d'aérosols produites est toutefois supérieure pour le micro-asperseur que pour le canon (6,1% contre 0,03%) de même que le risque de dérive (34% contre 18%). Les aérosols sédimentent moins rapidement que les gouttelettes et peuvent plus facilement se disperser. Cependant, la hauteur atteinte par le jet est généralement plus élevée pour les systèmes par aspersion. La sensibilité au vent est donc plus forte, augmentant ainsi les risques de dérive. Ces travaux confirment l'intérêt de la micro-aspersion pour réduire les risques pour les riverains et des passants liés à l'ingestion de gouttelettes d'eau ou d'aérosols (voies « Eau » et « Air »).

Les systèmes d'irrigation localisés ne sont pas envisageables pour toutes les cultures et l'irrigation par aspersion peut avoir un effet bénéfique pour les cultures. En effet, en apportant l'eau sur les feuilles, elle permet de refroidir les cultures et de les protéger notamment en cas de fortes sécheresses (Smith *et al.,* 2011 cité par Bozkurt *et al.,* 2021). D'autres mesures sont alors envisageables pour réduire les risques liés à l'aspersion comme l'orientation des buses vers le bas qui contribue à une réduction de 1 log selon les directives de l'OMS (2006) et australiennes (2006). Elles peuvent être complétées par des pratiques d'irrigation limitant les risques de dispersion comme l'arrêt de l'irrigation lorsque les vitesses du vent dépassent une certaine vitesse (voir section 1.3.4 p.85) ou bien l'utilisation de panneaux signalant les périmètres en cours d'irrigation (voir section 1.3.3.2 p.82).

- **Choix retenu pour le modèle**

L'AF du 18/12/2023 n'intègre la contribution de ces systèmes d'irrigation à faible pression pour la réduction des risques. Compte tenu des éléments présentés précédemment, nous avons néanmoins décidé de l'intégrer à la base de données. Grâce aux informations fournies par les cadres normatifs et

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

la littérature, différentes contributions ont été définies pour l'utilisation de systèmes d'irrigation par micro-aspersion ou en couverture intégrale (Tableau 17).

Voie / Système d'irrigation	« EAU »	« SOL »	« PLANTE » / « PRODUIT FINAL »				« AIR »	Exposition
			Dans le sol(1)	*En surface*(1)	*En surface à +25cm du jet*(1)	*En surface à +50cm du jet*(1)		
Micro-aspersion /couverture intégrale	1 log (volume d'exposition)	1 log (volume d'exposition)	1 log (volume d'exposition)	1 log (volume d'exposition)	2 log (volume d'exposition)	4 log (volume d'exposition)	1 log (volume d'exposition)	Absence d'exposition pour les riverains
Orientation des buses vers le bas	1 log (volume d'exposition)	-	-	-	-	-	1 log (volume d'exposition)	-

Légende : (1) = par rapport à la plante pour la voie « Plante » et par rapport à la partie comestible pour la voie « Produit final »

Tableau 17 : Contributions retenues dans le modèle pour la mesure « micro-aspersion » et « couverture intégrale »

Compte tenu de la plus faible portée du jet d'irrigation et de la hauteur, il a été considéré dans notre modèle que l'utilisation de ces systèmes contribuait à empêcher les risques d'exposition des riverains. Pour les passants, la réduction du volume d'exposition de 1 log a été retenue pour voie « Air » et « Eau » en se basant sur les directives de l'OMS (2006) et australiennes (2006). Il serait nécessaire de mieux caractériser la réduction associée en intégrant la proportion d'aérosols produite et leur potentiel de dérive mais aussi l'impact des conditions environnementales sur la dispersion et la viabilité des micro-organismes pathogènes. Le sol agissant comme une barrière physique, une réduction de 1 log a également été considérée pour la voie « Sol » et également pour les cultures racinaires (voie « Plante »). Pour les voies « Plante » et « Produit final », une contribution de 1 log a été considérée pour l'ensemble des cultures compte tenu des indications des directives de l'OMS (2006) et australiennes (2006). Il serait néanmoins important de mieux préciser le volume apporté sur les parties comestibles. La contribution de la distance proposée par la norme ISO 16075-2 (2020) a également été retenue. Elle paraît intéressante notamment pour les systèmes d'irrigation sous frondaison utilisé en arboriculture. Le jet étant orienté au niveau du tronc, les fruits ont une probabilité plus faible d'être contaminés (Mara & Horan, 2003). Cette distance est à considérer par rapport à l'ensemble de la culture pour la voie « Plante » et par rapport aux parties comestibles pour la voie « Produit final ».

Dans l'AF du 18/12/2023, il est indiqué pour l'utilisation d'une qualité B sans barrière « *l'irrigation pour l'arboriculture fruitière est interdite pendant la période allant de la floraison à la cueillette pour les fruits non transformés, sauf en cas d'irrigation au goutte à goutte* ». Cette interdiction risque d'impacter ces cultures. En effet, bien qu'un contrôle de l'irrigation soit effectué pendant la phase de croissance pour limiter la sensibilité au maladie, l'irrigation peut jouer un rôle important pour maintenir une hydratation favorable à la croissance des fruits. Un déficit hydrique peut par exemple impacter le calibre des fruits et provoquer un décalage de maturité (Plénet *et al.,* 2010). Les épisodes de gels qui ont marqué la fin du mois de mars en 2022 ont monté l'intérêt de l'irrigation pour limiter les impacts sur les cultures. Il semblerait donc important de pouvoir mieux évaluer les risques liés à l'utilisation des EUT pendant la floraison et pouvoir intégrer la contribution du système d'irrigation dans la réduction des risques pour ces cultures.

- **Besoins identifiés et évolutions possibles du modèle**

Les contributions effectives de la micro-aspersion à la réduction des risques nécessiteraient néanmoins d'être mieux caractérisés. En effet, compte du potentiel de dispersion des aérosols, établir « *un espace d'air exempt d'aérosols* » entre le jet d'irrigation et les parties comestibles tel qu'indiqué par la norme ISO 16075-2 (2020) pourrait être difficile à appliquer. Cela confirme le besoin de pouvoir mieux caractériser la dispersion des aérosols associée à ces systèmes et les volumes qui pourraient

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

éventuellement se retrouver sur les parties comestibles. Cela semble d'autant plus important que l'utilisation des systèmes par micro-aspersion a doublé entre 2010 et 2020 (Pages & Parisse, 2024). Cette évolution est amenée à se maintenir compte tenu des enjeux liées aux économies des ressources en eau. En effet, une économie d'eau potentielle est estimée de 20 à 30 % pour le passage d'un système en aspersion vers un système d'irrigation localisé (micro-aspersion ou goutte à goutte de surface et enterré) (Serra Wittling & Molle, 2017). Au-delà de leur contribution à la réduction des risques, ces systèmes présentent donc un intérêt environnemental qui serait à intégrer.

ii. Technique d'irrigation localisée : goutte à goutte de surface et enterré

- **Recommandations des cadres normatifs et choix identifiés dans la littérature**

Une réduction plus importante est obtenue en utilisant des systèmes à faible débit et localisant l'irrigation au pied de la plante comme le goutte à goutte. Comme indiqué lors de l'analyse des cadres réglementaires, les réductions associées à ces systèmes diffèrent selon les cadres bien que les références mentionnées sont parfois identiques. Par exemple, l'OMS (2006) indique s'être basée sur les prescriptions indiquées par les directives australiennes de 2005. Néanmoins, les données utilisées par les directives australiennes de 2006, qui se basent également sur celles de 2005, sont différentes. La norme ISO 16075-2 (2020) s'est basée sur les données de l'OMS (2006) et indirectement sur celles des directives australiennes (2006) en reprenant les données des directives de l'US-EPA (2012). Cependant, certaines données ont été adaptées. Par exemple, la contribution d'un système en goutte à goutte de surface est exclue par la norme ISO 16075-2 (2020) pour les cultures racinaires et à la surface du sol contrairement aux directives de l'OMS (2006). Une réduction de 6 log est considérée « *lorsque l'eau ne remonte pas à la surface du sol par capillarité* » alors que l'OMS (2006) n'indique pas cette mesure et qu'une réduction de 4 log est attribuée par les directives australiennes (2006). Afin de comprendre ces différences et établir nos choix, les références scientifiques utilisées pour établir ces réductions ont été identifiées et analysées.

La première référence indiquée est le *Handbook of Water and Wastewater Microbiology* (Mara & Horan, 2003) et notamment le chapitre consacré aux mesures de contrôle des micro-organismes pathogènes pour la réutilisation des eaux usées en agricole rédigé par Shuval & Fattal (2003), deux chercheurs israéliens ayant contribué aux directives de l'OMS (2006). Concernant le goutte à goutte, les auteurs reprennent les travaux de Sadovski *et al.* (1978) qui ont évalué, en condition terrain, les contaminations microbiologiques de concombre et d'aubergine irrigués avec différents systèmes. Les résultats ont monté que malgré l'utilisation d'une eau fortement concentrée en micro-organismes pathogènes (1,1 x 10^5 CF NPP/100mL, 10^9 entérovirus UFP/100mL), l'utilisation d'un système d'irrigation en goutte à goutte de surface ou enterré apporte une réduction significative de la contamination sur les végétaux. Les auteurs ont également indiqué que l'utilisation d'une bâche plastique séparant les cultures du système d'irrigation augmentait la réduction de 2 log. Cela fait écho à la mesure proposée par la norme ISO 16075-2 (2020) qui indique que l'application d'une bâche permet une réduction de 2 à 4 log. Cette mesure *barrière* n'est néanmoins pas considérée par l'OMS (2006) et les directives australiennes (2006). Shuval & Fattal (2003) concluent donc qu'une réduction de 2 log peut être attribuée au goutte à goutte de surface et 2 log supplémentaire pour le goutte à goutte enterré par rapport à l'irrigation par aspersion. Ces données expliquent pourquoi l'OMS (2006) et les directives australiennes (2006) ont considéré une réduction de 2 log même pour les cultures qui poussent sur le sol. Shuval & Fattal (2003) indiquent également que c'est une estimation « *prudente* » et que la réduction pourrait être encore plus importante lorsque les parties comestibles sont en hauteur par rapport au sol. D'autres études, qui ont également été utilisées par les directives, confirment ces résultats. C'est le cas par exemple des travaux d'Oron *et al.* (1991) sur la vigne. Ces

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

auteurs ont monté l'importance de la distance vis-à-vis de l'émetteur ainsi que l'influence du sol dans la survie des micro-organismes pathogènes. Les données produites par Sadovski *et al.* (1978) ont été utilisées pour les premières modélisations des risques concernant la REUT (Van Ginneken & Oron, 2000). Néanmoins, Sadovski *et al.,* (1978) ont indiqué que leurs données présentaient certaines limites compte tenu des méthodes de quantification des micro-organismes de l'époque. Des études plus récentes sur le sujet ont donc été étudiées.

Par exemple, l'étude de Reyes *et al*. (2020) ont évalué la contribution d'un système en goutte à goutte enterré pour réduire les risques de contamination. Ils ont irrigué, douze jours avant la récolte, des laitues cultivées sous serre (hors sol) avec une eau contenant une concentration en *E.Coli* de 10^{11} UFC/100mLet en MS2 phage (virus) de 10^{13} UFP/100mL. Aucun des échantillons était positif que soit sur les tissus ou sur les feuilles malgré ces concentrations élevées. Les auteurs concluent que le sol agissant comme une barrière permet l'utilisation d'une eau de qualité inférieure. Ils ont indiqué que la surface était restée sèche, ce qui appuie la spécification la norme ISO concernant la remontée par capillarité. Les cultures racinaires comme l'oignon sont souvent associées à des épidémies. L'étude de Racine *et al.,* (2024) sur la contamination des oignons a montré que l'irrigation par aspersion entrainait une prévalence de contamination plus élevée que l'utilisation d'un système en goutte à goutte. D'autres études ont également montré l'intérêt d'un système en goutte à goutte pour réduire les risques de contamination en localisant l'irrigation au pied de la plante et limitant les éclaboussures (Allende *et al.,* 2017 ; Bozkurt *et al.,* 2021).

- **Choix retenu pour le modèle**

Les réductions retenues sont présentées dans le Tableau 18.

Voie / Système d'irrigation		EAU	SOL	PLANTE / PRODUIT FINAL				AIR	Exposition
				Dans le sol[(1)]	*En surface*[(1)]	*En surface à +25cm du goutteur*[(1)]	*En surface à +50cm du goutteur*[(1)]		
Goutte à goutte de surface	V1	Absence de projection[(2)]	0	2 log (volume d'exposition)	2 log (volume d'exposition)	3 log (volume d'exposition)	5 log (volume d'exposition)	Absence d'aérosols	Absence d'exposition pour les riverains et les passants
	VF		0	0	0	2 log (volume d'exposition)	4 log (volume d'exposition)		
Goutte à goutte enterré		Absence de projection[(2)]	0	0	6 log (volume d'exposition)	6 log (volume d'exposition)	6 log (volume d'exposition)	Absence d'aérosols	Absence d'exposition pour les riverains et les passants

Légende : (1) = localisation de la partie comestible ; (2) = des projections peuvent néanmoins avoir lieu lors d'une défaillance du système d'irrigation

Tableau 18 : Contributions retenues pour les mesures « goutte à goutte de surface » et « goutte à goutte enterré »

Pour le goutte à goutte de surface, les données indiquées par les directives australiennes (2006) et de l'OMS (2006) avaient été initialement reprises dans notre base de données (« V1 »,Tableau 18). Néanmoins, avec la parution de l'AF du 18/12/2023 indiquant que l'irrigation localisée doit être « *sans contact des parties comestibles avec les eaux usées traitées* », les données ont été modifiées et les valeurs de l'arrêté ont été reprises (« VF », Tableau 18). Les données de la littérature indiquent cependant une contribution avérée du goutte à goutte qui serait à considérer pour les cultures racinaires et de surface.

Concernant le goutte à goutte enterré, les données indiquées par l'AF du 18/12/2023 ont été reprises. En l'absence d'indication sur les cultures concernées, il a été considéré que cette réduction est valable pour l'ensemble des cultures dont la partie comestible est en surface. Compte tenu de l'absence de production d'aérosols ou de gouttelettes pouvant se disperser, il a également été considéré que les

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

riverains mais aussi les passants n'étaient pas exposés. Seuls les riverains étaient concernés pour les systèmes d'irrigation à faible pression présentés précédemment.

La bâche de séparation, indiquée par la norme ISO 16075-2 (2020) a également été retenue. Elle permet d'apporter une réduction supplémentaire au goutte à goutte de surface. La réduction indiquée par la norme ISO 16075-2 (2020) varie de 2 à 4 log. Néanmoins, aucune précision n'est apportée pour déterminer les conditions dans lesquelles la valeur haute ou la valeur basse doit être utilisée. Compte tenu de la contribution de la distance, il a été considérée qu'une réduction de 2 log du volume d'exposition était valable pour les cultures en surface et 4 log pour les cultures sans contact avec le sol. Elle concerne donc les voies « Plante » et « Produit ».

L'utilisation des systèmes d'irrigation à faible pression et/ou localisés pourraient présenter des intérêts environnementaux et économiques puisqu'ils permettent une optimisation de la ressource en eau. Cependant, les risques liés à l'obstruction des goutteurs doivent également être pris en considération notamment si la qualité de l'eau est diminuée (WHO 2006 ; Amoah *et al.,* 2011). Les teneurs en micro-organismes, nutriments ou encore en matière organique peuvent être plus élevés dans des eaux de qualité inférieure et être un bénéfice agronomique pour la plante. Néanmoins, cela augmente les risques de colmatage des goutteurs. Ces systèmes sont donc plus sensibles à la qualité que des systèmes par aspersion. Les traitements tertiaires et notamment la chloration sont des moyens intéressants pour limiter l'obstruction (Capra *et al.,* 2007). Les bénéfices et les limites doivent donc être pesés pour choisir ces systèmes. Ils peuvent également représenter des coûts d'investissement élevés (Hamilton *et al.,* 2018).

Les coûts associés à ces systèmes ont été estimés ainsi que ceux des systèmes d'irrigation par aspersion et par micro-aspersion (Tableau 19).

	CAPEX (€)		**OPEX (€/ha)**			
EQUIPEMENTS	*Par équipement (€/ha)*	*Par équipement intégrant les renouvellements (€/ha)*	*% du CAPEX*	*Par équipement (€/ha/an)*	*Nombre de renouvellement sur 20ans*	*Par équipement sur 20ans (€/ha)*
Aspersion – rampe/pivot	2 000	2 000	5	100	0	4 000
Aspersion – canon	1 875	1 875	2	37,5	0	2 625
Micro-aspersion	8 200	8 200	2	164	0	11 480
GG – surface	2 100	8 100	2	42	3	8 940
GG enterré	3 400	7 933	2	68	1	9 293

Tableau 19 : Coûts estimés pour les systèmes d'irrigation

Nous avons donc montré dans cette section la contribution non-négligeable des systèmes d'irrigation dans la réduction des risques d'exposition mais aussi dans la réduction des volumes d'exposition. Comme indiqué précédemment, malgré l'intérêt qu'ils représentent, l'utilisation de ces systèmes ne sont pas envisageables pour toutes les cultures en particulier pour les grandes cultures. D'autres mesures peuvent alors être mises en place pour réduire les risques d'exposition qui seront le sujet de la section suivante.

1.3.3.2 Contrôle de l'exposition des professionnels et non-professionnels

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

i. Signalisation du réseau de distribution et du périmètre irrigué et contrôle de l'accès

- **Recommandations des cadres normatifs et choix identifiés dans la littérature**

Des non-professionnels peuvent circuler à proximité des périmètres irrigués et être exposés aux EUT. Les panneaux de signalisation sont une solution peu coûteuse pour prévenir leur exposition (WHO, 2006). Ils sont recommandés dans de nombreux cadres normatifs en particulier pour les usages urbains. Les informations trouvées dans les directives australiennes (2006) ou de l'US-EPA (2012) ne sont donc pas spécifiques à l'irrigation agricole mais sont intéressants à présenter.

Les directives australiennes indiquent que ces panneaux doivent respecter les prescriptions de conception indiquées par les standards nationaux (NRMMC *et al,* 2006). Ainsi, différentes normes sont imposées donc l'utilisation d'une couleur spécifique à la REUT, qui peut être assimilée au violet (Figure 14, extrait 1). Cette couleur est aussi utilisée dans certains Etats américains. Les réseaux de distribution sont également de cette couleur pour être distingués des autres réseaux en particulier ceux d'eau potable comme par exemple en Californie (Figure 14, extraits 2 et 3). Cette coloration pourrait être envisagée en France. Néanmoins, elle peut être compliquée à mettre en place dans une approche « *qualité selon l'usage* » où les EUT peuvent correspondre à différentes qualités.

Concernant le message à indiquer sur les panneaux, l'OMS (2006) parle de panneaux « *de mise en garde* ». Le RE 2020/741 indique que les panneaux doivent signaler quand l'irrigation est en cours et qu'il ne faut pas pénétrer dans le périmètre (Maffettone & Gawlik, 2022). Pour les directives australiennes, il est important d'avertir sur l'utilisation d'EUT mais aussi de promouvoir la pratique (NRMMC *et al.,* 2006). Le choix du message associé est donc important. La mise en place de panneaux était requise pour les espaces verts dans l'arrêté du 02/08/2010 mais pas indiquée pour l'irrigation agricole. Un exemple pour l'irrigation agricole a été identifié à la Flotte-en-Ré dans un article du magazine *Actu Environnment* (Figure 14, extrait 4). Cet exemple est intéressant car le panneau informe de l'utilisation des EUT mais aussi de l'autorisation du projet et les bénéfices attendus. L'AF du 18/12/2023 indique une obligation de mettre en place ces panneaux à l'entrée des espaces « *ouverts au public* ». Les périmètres agricoles sont des espaces privés mais qui peuvent être bordés par des chemins d'exploitation ou par des chemins de randonnée. Néanmoins, aucune information n'est apportée sur la localisation de ces panneaux ni le nombre à mettre en place. L'AF du 18/12/2023 indique également que le pictogramme « *eau non potable* » doit être présent à tous les points d'entrée et de sortie des vannes et des appareils. Une obligation qui semble difficilement envisageable à l'échelle des réseaux de distribution agricole.



Extrait 1 : Communication de la WaterReuse California Communications Collaborative Group (2021) concernant les prescriptions techniques à suivre pour la signalisation des périmètres irrigués avec des EUT



Extrait 2 : Communication de la Sydney Water, une entreprise publique de services d'eau en Australie, concernant la signalisation des systèmes de distribution des eaux recyclées (Sydney Water, 2024)

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés



Extrait 3 : idem que l'Extrait 2 (Sydney Water, 2024)



Extrait 4 : Article publié sur le site ActuEnvironnement le 06/05/2021 présentant le cas de REUT de la Flotte-en-Ré (Charente-Martime) (Laperche, 2021)

Figure 14 : Exemples de signalisation du périmètre irrigué et du réseau de distribution

- **Choix retenus pour le modèle**

Aucune réduction logarithmique n'a été attribuée pour ces mesures (NRMMC *et al.,* 2006). Il a été considéré, dans notre base de données, que la mise en place des panneaux signalant le périmètre irrigué pouvait contribuer à réduire les risques d'exposition des passants circulant à proximité. Néanmoins, l'efficacité de cette mesure repose sur la responsabilité individuelle de respecter ou non la mesure. Concernant les réseaux de distribution, seule la mise en place de panneaux a été intégrée. Il a alors été considéré qu'elle contribue à limiter les risques de confusion par les professionnels et les non-professionnels. Comme indiqué par l'OMS (2006), c'est une solution qui est effectivement peu coûteuse puisqu'elle a été estimée à 30 €/unité (Leseur, 2023).

La norme ISO 16075-2 (2020) indique que le contrôle de l'accès des animaux ou des ouvriers au périmètre irrigué pendant les 24 heures qui suivent l'irrigation contribue à une réduction de 0,5 à 2 log voir 2 à 4 log si la restriction est au moins de 5 jours. Le contrôle de l'accès est également indiqué dans les autres cadres. Il peut être permanent ou temporaire et peut être mis en place grâce à des clôtures (NRMMC *et al.,* 2006 ; RE 2020/741). Ainsi, l'interdiction du public au moment de l'aspersion permet de réduire considérablement l'exposition (Anses, 2012a). Cette mesure est généralement indiquée pour les usages urbains. Il a néanmoins été considéré que le contrôle permanent de l'accès permettait une absence de risques pour les passants. La possibilité de mettre en place cette mesure doit être discutée avec les acteurs du terrain. Pour la contribution du contrôle temporaire, cela sera abordé dans la section « Pratiques culturales » puisque faisant écho à l'attente d'un temps de dépérissement naturel des micro-organismes pathogènes après la dernière irrigation (voir 1.3.4.2).

ii. Automatisation et mécanisation des étapes du cycle cultural

Comme nous l'avons vu précédemment, les travailleurs agricoles peuvent être exposés lors de l'utilisation des EUT mais aussi lors de l'entretien ou la récolte des cultures irriguées. Dans son rapport de 2012, l'Anses n'intègre pas l'évaluation des travailleurs pour l'irrigation des cultures agricoles par voie respiratoire. L'Anses considère que les travailleurs ne sont pas présents et qu'ils ne doivent pas être présents au moment de l'irrigation, contrairement aux travailleurs dans les espaces verts (Anses, 2012a). Afin de discuter cet élément avec les acteurs opérationnels, il a donc été considéré dans notre base de données que l'utilisation de systèmes d'irrigation automatique permettrait l'absence d'exposition du personnel en charge de l'irrigation, contrairement à des systèmes d'irrigation manuels (arrosoirs, tuyaux d'arrosage…). Cette mesure a été vivement discutée lors de l'utilisation du modèle sur différents cas d'étude (Chapitre 3).

L'OMS (2006) considère que la mécanisation de l'agriculture contribue également à réduire la dose d'exposition du personnel agricole ainsi que la fréquence d'exposition. Comme mentionné précédemment, la quantité de sol ingéré par le personnel agricole travaillant dans les champs diminue

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

de 1 à 10 mg (mécanisée) contre 10 à 100 mg (faiblement mécanisée). La fréquence d'exposition est également diminuée à 100 jours par an contre 300 jours. Cette mesure contribue donc à modifier les paramètres d'exposition pour les voies « Sol » et « Plante » pour le personnel agricole. Lors de la co-construction avec les acteurs de Clermont-Ferrand que nous aborderons dans le chapitre 2, la contribution de cette mesure a été modifiée. Il a été considéré que la mécanisation des étapes d'entretien et de récolte des cultures permettait de considérer une non-exposition du personnel agricole. Les charges associées à cette mesure n'ont pas pu être estimés dans le cadre de la thèse compte tenu de la forte variabilité.

iii. Port d'équipements de protection individuelle

- **Recommandations des cadres normatifs et choix identifiés dans la littérature**

Le port d'équipements de protection individuelle (EPI) par les professionnels, en particulier les bottes et les gants, est encouragé dans les cadres normatifs. Aucune réduction log n'est néanmoins indiquée. Les directives australiennes (2006) indiquent que la contribution de cette mesure est difficile à estimer. Pour l'OMS, un « *effet positif important* » peut être attendu par cette mesure. Elle permet de diminuer les risques pour les professionnels voire de les éliminer (WHO, 2006).

En effet, les études épidémiologiques ont montré que le port d'EPI est un facteur contribuant fortement à la réduction des risques pour les professionnels (Adegoke *et al.,* 2018). Ainsi, une étude menée au Sénégal a montré que chez les agriculteurs n'étant pas équipés de gants, de masques et de bottes, le taux d'infection à Ascaris (helminthes) était de 50 %. Chez les agriculteurs équipés, le taux d'infection est de 26% (Gaye & Niang, 2010 cité par US-EPA, 2012). L'efficacité des EPI a été prouvée dans de nombreux domaines : application des produits phytosanitaires, domaine médical… Ils contribuent également à limiter les risques de transmission secondaire aux familles notamment. Cependant, cette mesure est reconnue comme difficile à faire appliquer. En effet, les EPI représentent à la fois une contrainte réelle, en particulier en cas de fortes températures ou pour certains travaux manuels, mais aussi une contrainte perçue. Ils sont souvent considérés par les professionnels comme une gêne au travail et inconfortables. Les études ont montré que le port des EPI est corrélé à la perception des risques. Ainsi, lorsque les risques associés à la réutilisation des eaux usées sont perçus comme étant faible, les EPI sont perçus comme inutiles (Keraita *et al.,* 2008 ; Drechsel *et al.,* 2011 ; Amoah *et al.,* 2011). La perception des risques joue donc un rôle important pour l'application de cette mesure (Drechsel *et al.,* 2011). Des campagnes d'information et de sensibilisation sur « *les risques invisibles* » sont alors importantes pour encourager le port des EPI mais aussi les bonnes pratiques d'hygiène (US-EPA, 2012).

- **Choix retenu pour le modèle**

Cette mesure a été intégrée dans notre base de données en indiquant qu'elle contribuait à réduire les risques pour les professionnels. Aucune réduction log n'a néanmoins été associée. Comme pour la signalisation du périmètre irrigué, cette mesure repose sur la responsabilité individuelle. Sa contribution doit donc être discutée avec les acteurs concernés pour valider sa contribution à la réduction des risques.

1.3.4 Importance des pratiques d'utilisation des EUT et culturales (P)

La section précédente nous a permis d'identifier l'importance du choix des équipements dans la réduction des risques. Les pratiques mises en place jouent également un rôle clé dans la gestion des risques. Elles ne concernent pas uniquement l'utilisation des EUT mais l'ensemble du système, du choix

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

des cultures irriguées jusqu'à la consommation des produits en passant par la conduite de l'itinéraire technique après l'irrigation. C'est le sujet de cette partie.

1.3.4.1 Choix des cultures

- **Recommandations des cadres normatifs et choix identifiés dans la littérature**

Des microorganismes pathogènes peuvent persister à la surface des parties comestibles des cultures et contaminer le consommateur. L'application de restrictions sur les cultures, c'est à l'interdiction d'utiliser les EUT pour certaines cultures, est une des premières mesures conseillées par l'OMS dans ses directives pour protéger le consommateur. En effet, les résultats des études épidémiologiques ont montré que certaines cultures présentent un risque de contamination élevé : les cultures consommées crues, les cultures poussant à proximité du sol comme les laitues ou encore les cultures racinaires comme les oignons (Blumenthal *et al.,* 2003 cité par WHO, 2006). Les propriétés physiques des végétaux contribuent également à augmenter le potentiel de contamination telles que la présence de feuilles, des surfaces velues ou collantes contrairement à des surfaces lisses (Shuval *et al.,* 1997 ; Stine *et al.,* 2005 cité par WHO, 2006). D'autres éléments sont également à considérer : cultures non destinées à l'alimentation humaine, cultures consommées cuites ou après transformation… Ces critères sont également retrouvés dans la plupart des cadres normatifs pour définir les classes de qualité. D'autres critères indiqués ont également été identifiés :

- **distance de la partie comestible avec le système d'irrigation et/ou le sol** : « partie comestible en contact direct avec l'eau » (RE 2020/741 ; AF 18/12/2023), « plantes sarclées » (RE 2020/741) « plantes racines » (AF 18/12/2023) ;
- **destination/utilisation des cultures** : « vivrières » et « non vivrières » (AF 18/12/2023), « arboriculture fruitière » (FR 2010) ; « cultures servant à l'alimentation animale » (AF 18/12/2023), « espaces verts et forêts ouvert au public » (AF 02/08/2010)
- **préparation post-récolte** : « fleurs vendues coupées » (AF 02/08/2010), « légumes consommés crus » (ISO, 2020 ; AF 18/12/2023), « transformées par un traitement thermique industriel adaptés » (FR 2010), « vivrières transformées » (RE 2020/741; ISO 16075-2, 2020) , « pelage » (US-EPA, 2012) ;
- **méthodes d'irrigation** : « toutes les méthodes d'irrigation », « irrigation en goutte à goutte ou toute autre méthode d'irrigation permettant d'éviter un contact direct avec la partie comestible des cultures » (RE 2020/741)
- **calendrier d'irrigation** : « respect d'un délai après irrigation de dix jours » (AF 02/08/2010) ;

Les recherches bibliographiques ont permis d'identifier d'autres facteurs pouvant influencer le choix des cultures irriguées. Ainsi, une forte mécanisation contribue à diminuer les risques d'exposition du personnel agricole aux micro-organismes pathogènes. Au-delà de l'intégration d'un temps entre la dernière irrigation et l'accès au champ/la récolte/la consommation, la fréquence d'irrigation et le volume apporté sont des caractéristiques intéressantes à considérer. En effet, une irrigation répétée est associée à une exposition plus fréquente pour les professionnels (Seis *et al.,* 2022) ainsi qu'à une probabilité de contamination des produits plus élevée (Park *et al.* 2012 cité par Banach *et al.*, 2020). Certains auteurs considèrent néanmoins que le dépérissement naturel permet de compenser les épisodes successifs d'irrigation (Mok *et al.,* 2014). Des recherches seraient à mener sur ce sujet.

L'OMS (2006) reconnait que cette mesure est réalisable sous certaines conditions :

- la présence d'un marché en adéquation avec les cultures non concernées par la restriction ;
- que ces cultures soient « utiles » et assurent des profits suffisants aux agriculteurs ;
- que les cultures exclues par la restriction ne soient pas demandées par le marché.

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

Cependant, les restrictions ne vont pas toujours dans le sens des incitations du marché. Les cultures consommées crues représentent une part importante dans l'alimentation (FAO et WHO, 2023) et peuvent être vendues plus chères que d'autres cultures comme les cultures fourragères (WHO, 2006). De plus, les comportements des consommateurs tendent depuis les deux dernières décennies vers la consommation de produits frais (Rekhy & Mc Conchie, 2014 in Bozkurt *et al.*, 2021). L'actualisation du panorama de la REUT indique que le nombre de projets associés à des cultures céréalières est en baisse et indique ceux associés au maraîchage a augmenté, bien que cela soit encore assez limité (9 projets contre 7 identifiés par le panorama du Cerema) (Lombard-Latune et Bruyère, 2023). Il y a donc une légère tendance vers la production de cultures nécessitant plutôt des qualités supérieures. Le rapport de la Mission flash indique également que les coûts associés à la REUT peuvent être limités grâce à « *un usage à forte valeur ajoutée (vignes, arboriculture, maraîchage par exemple) avec un consentement à payer par l'utilisateur* » (Locqueville *et al.,* 2023). L'approche « *qualités selon l'usage* » où des classes de qualité sont imposées comme dans la norme ISO 16075-2 (2020), le RE 2020/741 ou encore l'AF du 18/12/2023 peut être interprétée comme une restriction sur les choix des cultures. En effet, compte tenu des coûts associés aux procédés de traitement avancés, la qualité A ne sera pas toujours atteignable. Les agriculteurs pourraient alors être amenés à adapter leurs choix de cultures en fonction de la qualité atteinte. Ces restrictions peuvent néanmoins avoir des conséquences importantes pour les agriculteurs.

Au-delà des impacts pour les agriculteurs, l'OMS indique une autre limite liée à la mise en place de restrictions sur le choix des cultures : l'encadrement réglementaire. Il peut ne pas être suffisant pour contrôler et s'assurer l'application de cette mesure par les agriculteurs. Il est donc important qu'ils soient associés aux discussions afin d'apporter leurs avis sur les restrictions envisageables et qu'ils soient sensibilisés sur les enjeux sanitaires associés au respect de cette mesure (WHO, 2006).

- **Choix retenu pour le modèle**

Les contributions retenues associées au choix des cultures dans notre base de données sont présentées dans le Tableau 20.

Critères de la culture	Populations concernées par la mesure	Contribution
Non destinée à la consommation humaine	Consommateur	Absence d'exposition du consommateur
Transformation obligatoire (ex : blé)	Consommateur	Application effective de la mesure « transformation » : Réduction de la concentration : 5 à 7 log
Cuisson obligatoire (ex : pomme de terre)	Consommateur	Application effective de la mesure « cuisson » : réduction de la concentration : 5 à 7 log
Forte mécanisation de l'itinéraire technique	Personnel agricole	Réduction de la fréquence d'exposition du personnel agricole
Calendrier cultural intégrant un temps entre la dernière irrigation et l'accès au périmètre irrigué ou la récolte	Personnel agricole et consommateur	Application de la mesure « Dépérissement au champ » : 0,5 à 2 log /jour
Distance de la partie comestible vis-à-vis du système d'irrigation	Personnel agricole et consommateur	Réduction du volume d'exposition : 1 à 4 log selon le système d'irrigation et la culture concernés
Possibilité d'utilisation des systèmes d'irrigation localisés	Personnel agricole, consommateur	Réduction du volume d'exposition : 1 à 4 log selon le système d'irrigation et la culture concernés
Faible besoin en eau d'irrigation (volume apporté et fréquence)	Personnel agricole, riverains, passants, consommateurs	Non intégré car serait à mieux caractériser mais pourrait contribuer au dépérissement au champ et à la réduction des fréquences d'exposition

Tableau 20 : Contributions associées à la mesure « choix des cultures »

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

Les coûts liés aux changements d'assolement n'ont pas pu être estimés car cela nécessitait un travail de caractérisation que nous avons jugé comme trop complexe pour être réalisé dans le cadre de cette thèse. Néanmoins, les coûts et plus largement les impacts associés aux restrictions seraient à évaluer et à discuter avec les acteurs concernés.

1.3.4.2 Utilisation des EUT : définition du programme d'irrigation

i. Mise en place d'une distance entre les périmètres irrigués et les zones sensibles pour les systèmes en aspersion

- **Recommandations des cadres normatifs et choix identifiés dans la littérature**

Nous avons montré que des aérosols peuvent se disperser dans l'air et être inhalés par les riverains ou les passants. L'OMS (2006) recommande la mise en place d'une « *zone tampon exempte de pulvérisation* » pour limiter l'exposition des populations à proximité des périmètres irrigués. Comme mentionné lors de l'analyse des cadres normatifs, les distances indiquées varient de 25 m à 100 m pour une même réduction de 1 log (WHO, 2006 ; NRMMC *et al.,* 2006 ; ISO 16075-2, 2020). Les directives australiennes (2006) indiquent que la distance à mettre en place varie selon la qualité atteinte. Ainsi, aucune distance n'est requise pour une eau de « qualité élevée », une distance de 30 m pour une eau « *de* qualité modérée » et jusqu'à 100 m pour une eau de « faible qualité ». Les concentrations associées à ces qualitatifs non néanmoins pas été retrouvées. Une réduction de 1 log est également attribuée dans la norme ISO 16075-2 (2020) pour la mise en place de distances supérieures à 70 m par rapport aux zones résidentielles ou aux lieux accessibles au public lors de l'irrigation des jardins publics. Des distances sont également préconisées selon la qualité des EUT atteinte, les caractéristiques des arroseurs (rayon de projection et pression maximale de fonctionnement) et la présence d'écrans de protection (arbres, murs, filets-brise). Aucune réduction log n'est cependant attribuée. Il est indiqué que cette mesure doit être considérée comme « *équivalente à une barrière seulement, en raison des aérosols dispersés dans l'air* ».

Les prescriptions de la norme ISO 16075-2 (2020) se basent sur la méthodologie utilisée par les directives portugaises de 2006 (NP 4434) (do Monte, 2007) ainsi que sur les résultats des travaux de Molle *et al.,* (2009). Les directives portugaises considèrent néanmoins un critère supplémentaire qui est la fréquentation des abords. Ainsi, lors de l'irrigation par aspersion avec une EUT dont la concentration est ≤ 200 UFC/100mL, la distance imposée est de 30 m pour une maison individuelle et 50 m pour un groupe de maisons (do Monte, 2007). Le nombre de personnes concernées peut être un facteur intéressant à intégrer dans l'évaluation des risques pour les riverains. Pour les passants, la fréquentation des chemins de passage à proximité des périmètres irrigués pourrait aussi être considérée comme un critère pour l'évaluation des risques.

L'AF du 18/12/2023 indique des contraintes de distances aux « zones sensibles ». Ces zones sont décrites comme « *les habitations, des cours et des jardins attenants aux habitations, des voies de circulation, des lieux publics et privés de passage et de loisirs, des bâtiments publics et des bâtiments d'entreprise* » avec les voies de circulation définies comme les « *voies publiques dédiées au passage des populations piétonne, équestre et cycliste »* (Annexe III). Les contraintes reprennent en partie celles indiquées dans la norme ISO 16075-2 (2020). Elles ne considèrent pas la qualité atteinte ou les pressions de fonctionnement maximale Des prescriptions de distance correspondant à « deux fois la portée » peuvent être définies. C'est une référence aux conclusions des travaux de Molle *et al.* (2009). Les auteurs avaient indiqué que ces conclusions correspondent à une surestimation du risque d'évaporation et de dérive. En effet, les volumes de dispersion ont été calculés dans des conditions reconnues comme extrêmes. Or les agriculteurs irriguent rarement lorsque le vent dépasse 4 $m.s^{-1}$ et

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

les conditions d'évaporation qui ont été simulées sont rarement rencontrées en France (Molle *et al.,* 2009). Des distances sont également définies dans l'AF du 18/12/2023 vis-à-vis d'autres activités comme la baignade, les activités nautiques, les plans d'eau, la conchyliculture ou encore l'abreuvement du bétail allant de 20 à 200 m selon la qualité d'eau atteinte et l'activité. Il semble intéressant de comparer les distances indiquées pour la REUT avec celles pour d'autres usages. Par exemple, selon l*'Arrêté du 27 décembre 2019 relatif aux mesures de protection des personnes lors de l'utilisation de produits phytopharmaceutiques*, basé sur les recommandations de l'Anses, les distances de sécurité requises peuvent aller de 5 à >20 m selon les produits utilisés et les cultures (MASA, 2023). Des distances bien plus faibles que celles recommandées pour la REUT. Concernant les stations d'épuration, aucune recommandation vis-à-vis des habitations n'est exigée. Pourtant, les concentrations en micro-organismes pathogènes sont plus élevées. Des aérosols peuvent se former et être transportés sur plusieurs kilomètres (Stellaci *et al.* 2010 ; Courault *et al.* 2017 ; EPA, 2018).

Plusieurs études ont montré que les probabilités de risque diminuent effectivement avec la distance (Courault *et al.,* 2017 ; Pepper et Gerba, 2019 ; Mori *et al.,* 2021 ; Zardari *et al.,* 2022 ; Massiot *et al.,* 2023). Néanmoins, les risques liés à la dispersion des aérosols sont souvent estimés dans les conditions les plus défavorables. Or les conditions utilisées pour l'estimation des distances influencent fortement les résultats. Par exemple, dans leur étude portant sur les risques liés aux légionnelles, Hamilton *et al.* (2018) ont proposé grâce à la QMRA des distances jusqu'à plus de 600 m entre les habitants et les périmètres irrigués. Les auteurs de cette étude ont cependant reconnu que les conditions d'étude utilisées étaient extrêmes : vent de 7 $m.s^{-1}$, 65% d'humidité relative… Mori *et al.* (2021) indiquent des distances similaires, environ 625 m, mais reconnaissent également que les paramètres d'exposition utilisés pour leur QMRA étaient surestimés. Par exemple, ils considèrent une irrigation quotidienne afin de se placer dans un scénario *le plus défavorable.* Ces hypothèses restrictives semblent donc négliger la réalité du terrain comme la vitesse du vent généralement observée. Comme indiqué ultérieurement, les études sur le sujet ne prennent pas toujours en considération certains paramètres essentiels comme le volume d'aérosols (≤150 µm) effectivement produit (Zardari *et al.,* 2022). Les distances établies en se basant sur des vitesses de vent à 4 $m.s^{-1}$ pourrait donc correspondre à une éventuelle sur-estimation des risques.

Le caractère pénalisant des distances a été indiqué par certains contributeurs au projet d'arrêté (Gouvernement français, 2024). Il a également été indiqué que ces valeurs, bien qu'elles soient désormais des prescriptions et non plus des obligations, risquent d'être appliquées par défaut par les services instructeurs. Or comme indiqué par un contributeur : « *Il conviendrait également de rappeler qu'en cas d'une eau de qualité A européenne, pour rester dans l'esprit du règlement européen de telles mesures ne seront pas nécessaires (la qualité A étant jugée suffisamment protectrice en toute circonstance)* ».

Il serait donc intéressant de pouvoir mobiliser des méthodes plus précises pour évaluer les risques associés à l'irrigation par aspersion qui intègrent des modèles de dispersion et également l'influence des différents paramètres : la vitesse du vent, la distance, l'exposition des micro-organismes pathogènes aux conditions atmosphériques lors de la dispersion, la proportion d'aérosols effectivement dispersée, la hauteur de projection, les conditions atmosphériques (température, humidité…), le ratio inhalé ou encore les fréquences d'exposition. Une meilleure caractérisation des risques semble d'autant plus nécessaire que la mise en place de distances pourrait avoir des conséquences non négligeables pour les acteurs opérationnels. En effet, les cultures situées dans la zone tampon ne seront pas irriguées. Une étude sur les impacts liés aux restrictions en eau d'irrigation sur les exploitations et les filières agricoles a été menée en Beauce par Lejars *et al.* (2012). Une réduction des doses d'irrigation de 40 % pour les céréales (blés durs et blés tendres) peut entrainer une baisse de rendement entre 10 et 15 % et, par conséquent, une baisse de la marge brute entre 3 et 7%. Par exemple, les données de la Chambre d'agriculture des Landes indiquent que la marge brute

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

en moyenne pour le maïs grain varie de 648€/ha en non irrigué à 1 377€/ha en irrigué en 2022. Dans notre modèle, un exemple a été réalisé pour une parcelle en grande culture céréales/maïs. Ainsi, en considérant une parcelle de 1 ha (500 m x 200 m) irriguée avec un système par aspersion d'une portée de 20m, la mie en place d'une zone tampon sur une des bandes de 200m à cause d'un chemin de randonnée correspondrait à une surface non irriguée de 40 m (deux fois la portée) x 200m soit 0,8 ha. En reprenant les données de la Chambre d'agriculture des Landes, cela correspondrait à une marge brute d'environ 13 189 € avec la zone tampon contre 13 770 € soit une différence de 582 € soit 58 €/ha. Ces contraintes de distance auront donc des impacts économiques plus ou moins importants selon la taille du périmètre concerné mais aussi la pluviométrie et les cultures. Certaines cultures, comme le tournesol ou l'orge, sont en effet moins sensibles à la réduction d'eau que des cultures comme le maïs. Les calculs n'ont pas été fait pour notre base de données compte tenu de la forte variation entre les cultures. Les impacts économiques seraient intéressants à estimer et à discuter avec les agriculteurs au regard de la contribution à la réduction des risques associée

- **Choix retenu pour le modèle**

En attendant l'intégration de modèles permettant une meilleure estimation des volumes d'exposition associés à la dérive des aérosols et la contribution de différents paramètres techniques et environnementaux, la distance de 70m indiquée par la norme ISO 16075-2 (2020) a été retenue pour une réduction de 1 log. Cette réduction est indiquée pour l'arrosage des jardins publics. Néanmoins, cette distance correspond à deux fois la portée d'un canon par aspersion (40m), un système d'irrigation largement utilisé pour la REUT agricole ce qui justifie notre choix.

ii. Adaptation du calendrier d'irrigation : vitesse du vent et irrigation nocturne

- **Recommandations des cadres normatifs et choix identifiés dans la littérature**

Comme mentionné précédemment, le vent a un rôle significatif sur la dispersion des aérosols (Courault *et al.* 2017 ; Zardari *et al.,* 2022). Les directives australiennes indiquent que l'irrigation ne doit pas avoir lieu par temps de vent et que la direction du vent avant le lancement de l'irrigation doit être considérée (NRMMC *et al.,* 2006). Aucune information sur la vitesse considérée n'est indiquée mais une réduction de 1 log est associée à l'utilisation d'un anémomètre. Cette mesure est également indiquée par l'OMS (WHO, 2006). En effet, ce système permet de mesurer la vitesse du vent et donc de pouvoir contrôler l'irrigation lorsque le vent dépasse une certaine vitesse. L'article 4 de l'arrêté du 02/08/2010 modifié le 25/06/2014 spécifiait que l'irrigation par aspersion devait être mise en œuvre uniquement lorsque la vitesse moyenne du vent est supérieure à 15 $km.h^{-1}$. Cette contrainte est réduite à 20 $km.h^{-1}$ en cas d'aspersion à basse pression. L'utilisation d'un anémomètre était également requise pour mesurer la vitesse du vent et déclencher de façon automatique l'arrêt de l'irrigation. Ces prescriptions ne sont néanmoins plus obligatoires dans l'AF du 18/12/2023.

L'irrigation nocturne est également une mesure encouragée par les directives australiennes (NRMMC *et al.,* 2006) et le RE 2020/741. Elle n'est pas mentionnée dans l'AF du 18/12/2023. L'OMS indique cette mesure plutôt pour son intérêt environnemental puisqu'irriguer la nuit contribue à limiter les pertes liées à l'évaporation (WHO, 2006). Aucune réduction logarithmique n'est néanmoins attribuée pour cette mesure. L'irrigation nocturne présente certaines limites par rapport à l'irrigation en journée. En effet, compte tenu de l'impact des températures élevées et des rayonnements UV sur les micro-organismes pathogènes, l'irrigation en journée est plus favorable à l'abattement microbien (Anses, 2012a). La mise en place de cette mesure peut donc limiter la contribution de l'inactivation naturelle des micro-organismes pathogènes qui est présentée dans la section suivante.

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

- **Choix retenus pour le modèle**

L'arrêt de l'irrigation en cas de fort (≥ 15 km/h) a été considérée dans notre base de données comme une mesure envisageable pour réduire les risques d'exposition des riverains et des passants. Aucune réduction log n'est associée. Néanmoins, la mise en place de cette mesure contribue à ne pas augmenter les volumes d'exposition définis pour les voies « Eau » et « Air ». Il pourrait même être considéré dans certains cas que cela empêche leur exposition.

Concernant l'irrigation nocturne, il a été considéré que cela empêchait l'exposition des riverains et des passants. Par souci de simplification du modèle, la possibilité d'une re-suspension dans l'air des micro-organismes après l'irrigation n'a pas été considérée (Courault *et al.,* 2017).

1.3.4.3 Post irrigation : considération de l'inactivation naturelle des micro-organismes pathogènes s'opérant après la dernière irrigation

i. Adaptation du calendrier cultural

Des micro-organismes pathogènes peuvent persister dans les EUT, même après un traitement tertiaire (Anses, 2012a). Ils peuvent alors se retrouver sur les cultures irriguées, et notamment les parties comestibles, ou au niveau du sol. Ils représentent alors des risques pour les consommateurs et le personnel agricole intervenant au niveau des périmètres irrigués. Leur survie en dehors de l'hôte est cependant limitée et une décroissance assez rapide est observée quelques jours voire quelques heures après l'excrétion (IRCWD, 1985). L'OMS considère ainsi une inactivation naturelle des agents pathogènes à la surface des cultures entre « la dernière irrigation et la consommation » allant de 0,5 à 2 log par jour. Il est indiqué que cette réduction dépend néanmoins de nombreux facteurs : des caractéristiques des micro-organismes, du type de cultures, du type de sol, ou encore des conditions climatiques (rayonnements UV, humidité, température…). Par exemple, un temps chaud et sec permet un dépérissement plus rapide (2 log/j) qu'un temps froid ou humide (0,5 log/j). Il est également indiqué qu'un dépérissement plus lent des micro-organismes pathogènes s'opère dans le sol que sur des surfaces exposées des cultures (Strauss, 1985 cité par WHO, 2006). L'OMS considère néanmoins que cette réduction est « extrêmement fiable ». Une attention doit être portée sur certains micro-organismes, notamment les œufs d'helminthes. En effet, ces micro-organismes peuvent rester viables jusqu'à plusieurs mois (WHO, 2006). Le rapport d'Engelberg de 1985 invitait déjà à spécifier l'inactivation naturelle selon les différents types de micro-organismes pathogènes mais aussi selon les propriétés physiques et culturales des végétaux concernés (IRCWD, 1985) comme présenté dans la Figure 15.

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

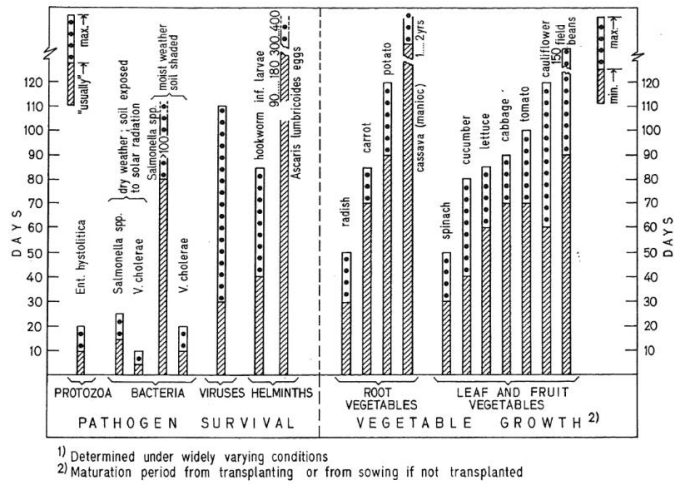


Figure 15 : Temps de survie des différents micro-organismes pathogènes en comparaison avec les périodes de croissance des végétaux dans des climats chauds (IRCWD, 1985)

Les directives australiennes considèrent une réduction fixe de 0,5 log/j entre l'irrigation et l'accès au périmètre irrigué ou la récolte des produits (NRMMC *et al.,* 2006). Il est indiqué que cette réduction se base sur l'inactivation des virus mais que les bactéries sont probablement inactivées à des réductions similaires. Concernant les protozoaires, il est mentionné qu'ils seront inactivés si le dépérissement implique une dessiccation (c'est-à-dire une forte déshydratation).

Une plage de réduction similaire aux directives de l'OMS est indiquée par la norme ISO 16075-2 (2020), le RE 2020/741 et l'AF du 18/12/2023. Néanmoins, elle concerne « l'arrêt ou l'interruption de l'irrigation avant la récolte ». Ainsi, le temps entre la récolte et la consommation n'est pas considéré contrairement aux directives de l'OMS (2006). Il est également indiqué que cela dépend des conditions météorologiques ainsi que les cultures irriguées. Aucune information n'est cependant apportée sur les conditions météorologiques et les cultures à considérer et leur influence sur la réduction. Pour les cultures fourragères et de semences, une réduction de 0,5 à 2 log est indiquée en cas d'une restriction de l'accès d'au moins 24h. Si la restriction est d'au moins 5 jours, une réduction de 2 à 4 log est à considérer. Ces indications suggèrent qu'une réduction log plus faible par jour se produit après une certaine période. La décroissance ne suit donc pas une décroissance linéaire. Néanmoins, aucune information supplémentaire n'est indiquée. Cet élément n'est pas considéré dans les valeurs indiquées par les directives de l'OMS (2006) et australiennes (2006). L'OMS mentionne néanmoins une décroissance bi-phasique dans ses directives, en faisant référence notamment à l'étude de Petterson *et al.* (2001a) (WHO, 2006).

Pour résumer, les cadres considèrent une réduction log entre 0,5 et 2 log par jour qui est soit fixe soit variable. Il est indiqué qu'elle dépend des conditions climatiques, des micro-organismes pathogènes considérés, des cultures irriguées mais ces informations sont peu précisées voir absentes. Il semble donc nécessaire d'identifier d'où proviennent ces réductions puis essayer de mieux caractériser les conditions qui les influencent.

Les directives de l'OMS et les directives australiennes indiquent plusieurs références. La première est l'étude d'Asano *et al.* (1992) que nous avons mentionnée à plusieurs reprises. Cette étude mobilise la QMRA pour estimer les risques associés à différents virus lors de l'utilisation d'EUT pour plusieurs usages. Les auteurs considèrent une constante de dégradation exponentielle des micro-organismes pathogènes de 0,69/j à la surface des cultures. Cette valeur proviendrait de travaux antérieurs des auteurs (Asano & Sakaji, 1990 cité par Van Ginneken & Oron, 2000). Dans les conclusions de leur étude, Asano *et al.* (1992) que cette valeur présente des limites. Elle ne tient pas compte des fluctuations saisonnières qui affectent la quantité de micro-organismes présents mais aussi les différents types de micro-organismes (Leong, 1983 cité par Asano *et al.,* 1992). Cette valeur a été reprise dans d'autres

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

études pour l'évaluation des risques liés à la REUT pour l'irrigation agricole. C'est le cas, par exemple, de l'étude de Van Ginneken & Oron (2000) où les auteurs considèrent néanmoins une plage variable située entre 0,65 à 0,73 log/j. D'autres études ont réalisé leurs propres estimations en conditions laboratoires. Ainsi, Petterson *et al.* (2001b) ont analysé la décroissance d'un bactériophage, *Bacteroides fragilis* (B40-8), sur des laitues irriguées quotidiennement par aspersion jusqu'à maturité avec une eau usée d'une concentration de 10^5 PFU/mL. Les laitues ont été récoltées et analysées à différents intervalles : au dernier jour de l'irrigation, ainsi qu'à un, trois, six et dix jours après la dernière irrigation. La modélisation des résultats a montré que la majorité de la population virale était inactivée à un coefficient de 2,48 log/j et que 0,12% de la population à un coefficient plus lent de 0,47 log/j. Ces résultats indiquent donc bien une décroissance bi-phasique du virus. Un autre groupe de laitue a été irrigué une seule fois avec la même concentration. La décroissance bi-phasique n'a pas été retrouvée et le coefficient de décroissance était estimé était à 0,992 log/j. Ces résultats indiquent que la prise en compte des fréquences d'irrigation semble importante. Des épisodes successifs d'irrigation peuvent entraîner l'accumulation des populations virales. L'inactivation bi-phasique indique la persistance de sous-population de virus qui peuvent rester infectieuses sur une certaine période. Les auteurs ont également mené l'expérience sur des carottes. Les conditions opératoires étaient similaires, hormis les conditions d'irrigation : 50 mL par plant, apportés par submersion pour simuler des conditions de sol totalement saturé sur deux heures. La modélisation des résultats a montré que la majorité de la population virale était inactivée à un coefficient plus faible de 0,838 log/j et que 2% de la population à un coefficient plus lent de 0,046 log/j. Pour le groupe avec une seule irrigation, le coefficient estimé était de 0,288 log/j, indiquant une décroissance inférieure à la laitue. Les auteurs concluent que le sol serait donc un environnement plus propice à la survie des micro-organismes pathogènes plutôt que les feuilles de laitue. Ces résultats ont ensuite été utilisés dans les directives de l'OMS (2006) et justifient une réduction de 7 log à atteindre pour les cultures poussant dans le sol. Certaines études plus anciennes avaient également indiqué que le dépérissement des organismes fécaux étaient plus lents dans le sol que sur les surfaces exposées des cultures (Strauss, 1985 cité par WHO, 2006). Les études épidémiologiques ont également confirmé que les risques étaient liés en particulier aux cultures racinaires telles que l'oignon (Blumenthal *et al.,* 2003 cité par WHO, 2006). Néanmoins, les valeurs de dépérissement indiquées par Petterson *et al.*(2001b) présentent quelques limites.

Tout d'abord, les auteurs reconnaissent que le choix de *B.fragilis* amène à une modèle conservateur car c'est un virus qui très résistant. Il est inactivé à des vitesses plus faible que la plupart des virus entériques. La transposition des données obtenues pour ce virus aux autres virus mais aussi aux autres types de micro-organismes pathogènes pourraient donc être une sous-estimation de la réduction. De plus, cette étude a été menée en conditions laboratoires. Les auteurs reconnaissent l'impact de facteurs contribuant à la réduction de la concentration, tels que le rayonnement UV ou la température sont négligés. Les auteurs concluent que les coefficients d'inactivation identifiés sont difficiles à interpréter à cause de leur variabilité vis-à-vis des conditions climatiques. Les auteurs indiquent également que les concentrations utilisées sont supérieures à celles attendues pour une eau réutilisée après un traitement secondaire. Leur conclusion concernant les carottes et l'impact du sol se basent à partir de données obtenues pour une irrigation par submersion. Or les volumes apportés et les conditions créées par cette technique d'irrigation peuvent être assimilées à un cas *le plus défavorable*. En effet, le sol est généralement saturé et l'humidité ou une forte teneur en matières organiques des sols favorisent la survie des micro-organismes pathogènes et sont propices à la dispersion (Strauss,1985 et Jiménez, 2003 cités par WHO, 2006). Des conditions différentes peuvent être attendues pour les autres systèmes d'irrigation, en particulier pour les systèmes en goutte à goutte.

Certaines études considèrent que le sol contribue à réduire les risques associés à l'utilisation d'EUT. Cette matrice assure un ensemble de mécanismes qui permettent une élimination des micro-organismes pathogènes grâce à ses différentes propriétés physiques de filtration, d'adsorption ou

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

encore de rétention mais aussi à sa biodiversité. Par exemple, dans le cas de l'utilisation d'EUT, il a été observé que les bactéries meurent rapidement à leur entrée dans le sol à cause de la compétition avec la flore indigène du sol (Tomaras *et al.,* 2009 cité par Le Roy *et al.,* 2020). Selon l'US-EPA, 99% des bactéries contenues dans les eaux usées traitées infiltrées dans le sol seraient éliminées dans les 30 premiers centimètres du sol (US-EPA, 2002 cité par Le Roy *et al.,* 2020). Les caractéristiques du sol influent le temps de survie des micro-organismes pathogènes. Par exemple, certains virus peuvent survivre plus longtemps dans des sols acides (Dreschel *et al.,* 2011) mais l'augmentation de la température est un facteur préjudiciable (Beaupoil *et al.,* 2010). Des recherches seront donc nécessaires pour mieux spécifier l'influence du sol dans le dépérissement naturel en particulier pour les cultures racinaires.

Peu d'informations est apportée sur l'application sur le terrain de cette mesure. Il semblerait que cette mesure puisse être naturellement intégrée dans l'itinéraire technique en fonction des cultures ou bien être imposées/proposées aux agriculteurs. Les retours d'expérience terrain ont néanmoins montré que cette mesure n'est pas toujours applicable, certaines cultures comme les salades sont irriguées quasiment jusqu'à la récolte pour assurer la fraîcheur du produit et leur valeur marchande (Blumenthal *et al.*, 2000 et Vaz da Costa Vargas *et al.,* 1996 cités par WHO, 2006 ; Keraita *et al.,* 2008 ; Drechsel *et al.,* 2011). La finalisation de l'irrigation avec d'autres sources peut alors être une alternative intéressante comme nous le verrons dans la prochaine section.

- **Choix retenus pour le modèle**

En attendant une meilleure spécification de la contribution de l'inactivation ou du dépérissement naturel des micro-organismes, il a été décidé de considérer une réduction moyenne de 1 log/j entre la dernière irrigation et la récolte pour les bactéries tel qu'indiqué par les directives de l'OMS (WHO, 2006). La réduction de 0,5 log/j a été retenue pour les virus et les protozoaires compte tenu des risques associés et de leur éventuelle plus grande persistance. Ce choix mériterait néanmoins d'être approfondi au regard de la littérature sur le sujet. La littérature invite, en effet, à mieux préciser la valeur du 0,5 log/j, reprises dans différents cadres réglementaires associés à la REUT mais aussi à l'irrigation agricole (Belias *et al.,* 2020). D'autres auteurs rejoignent également cette conclusion et encouragent à développer des formules intégrant des paramètres comme l'intensité du rayonnement ou les évènements pluvieux (Bozkurt *et al.,* 2021).

Cette réduction a été considérée entre la dernière irrigation et la récolte. La contribution d'un éventuel dépérissement entre la récolte et la consommation, tel que suggéré par l'OMS (2006), n'a pas été considéré dans cette première version. En effet, lors du stockage, les micro-organismes pathogènes sont moins soumis aux impacts des conditions environnementales qu'en plein champ. Les faibles températures généralement associées aux conditions de stockage peuvent contribuer à la survie des micro-organismes pathogènes compte tenu des faibles températures en particulier pour les oocystes des protozoaires (WHO, 2006). D'autres études ont indiqué que ces faibles températures pouvaient néanmoins avoir un impact sur la concentration d'autres micro-organismes comme par exemple *E.coli* 0157:H7 (Erickson *et al.,* 2015). La contribution de ces conditions serait donc à mieux spécifier.

ii. Finalisation de l'irrigation avec d'autres sources pour les cultures les plus sensibles

Pour les cultures nécessitant d'être irriguées quasiment jusqu'à la récolte, l'OMS propose de finaliser l'irrigation avec d'autres sources « non contaminées » (WHO, 2006). Cependant, cette mesure n'a pas été retrouvée dans les autres cadres normatifs étudiés et la littérature est peu abondante sur le sujet. Un exemple a été identifié chez Drechsel *et al.* (2011), dans le chapitre intitulé « *Mobiliser les*

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

connaissances et les perceptions des agriculteurs pour réduire les risques sanitaires de l'agriculture irriguée avec des eaux usées ». Des agriculteurs en Inde alternant l'utilisation d'eau souterraine avec des eaux usées en fonction du stade de croissance des cultures. Grâce à cela, les rendements ont été augmentés tout en diminuant les infections chez les travailleurs agricoles. Cet exemple confirme l'intérêt de mobiliser les connaissances et les perceptions des agriculteurs dans l'évaluation et la gestion des risques pour identifier des pratiques existantes.

Cette mesure a été intégrée dans la base de données, bien qu'aucune réduction log ne puisse être associée. Les exploitations agricoles possèdent parfois plusieurs réseaux d'eau (eau potable, forage, eau de surface) pour compléter les besoins. La finalisation pourrait donc être envisageable pour encourager l'utilisation des EUT même pour des cultures plus à risques comme la salade. Cette mesure suppose cependant i) que l'eau utilisée pour la finalisation soit d'une qualité suffisante pour ne pas augmenter la concentration en micro-organismes pathogènes déjà présente, ii) qu'un double réseau soit mis en place avec une identification claire des deux réseaux ou bien à minima l'obligation de réaliser une purge pour éviter une contamination de l'eau de finalisation et iii) une formation des professionnels pour éviter toute confusion. Des recherches sont à mener pour mieux caractériser la faisabilité de cette mesure.

1.3.4.4 Post-récolte : préparations des produits finaux

Dans les sections précédentes, nous avons vu qu'un ensemble de mesures peut être appliqué pour réduire les risques de contamination des cultures depuis la production des EUT jusqu'à leur utilisation au champ et tout au long du cycle cultural. Néanmoins, certains micro-organismes pathogènes peuvent persister à la surface des produits récoltés. Nous allons voir dans cette section que les préparations post-récolte ont une contribution non-négligeable pour assurer l'élimination de ces micro-organismes pathogènes résiduels et protéger le consommateur. Différentes mesures peuvent être envisagées : cuisson, lavage à l'eau potable ou à l'aide d'une solution désinfectante ou encore l'épluchage. L'OMS considère ces mesures comme « extrêmement fiables » (WHO, 2006). Néanmoins, elles élargissent les limites du système de REUT à d'autres maillons comme la distribution ou la consommation. Cet élargissement soulève des interrogations en particulier en terme de surveillance et de partage des responsabilités. Les différentes mesures post-récolte seront d'abord détaillées. La section finale sera consacrée à l'organisation de la mise en œuvre de ces mesures. Nous verrons également que pour l'ensemble de ces mesures, les coûts associés n'ont pas été estimés dans le cadre de la thèse.

i. Cuisson et transformation

- **Recommandations des cadres normatifs et choix identifiés dans la littérature**

L'OMS considère que la cuisson des produits, c'est-à-dire leur immersion « *dans une eau bouillante ou proche de l'ébullition jusqu'à ce qu'ils soient cuits* » apporte une réduction de 6-7 log des microorganismes pathogènes (WHO, 2006). Cette réduction est également reprise par la norme ISO 16075-2 (2020) et le RE 2020/741. Ces cadres normatifs intègrent également la cuisson à « haute température », pour une même réduction log. Les directives australiennes considèrent une réduction plus faible pour cette mesure, de 5-6 log, et intègrent également la « transformation » des cultures récoltées (NRMMC *et al.,* 2006). La cuisson et la transformation ne sont pas indiquées dans la liste des mesures barrières envisagées par l'AF du 18/12/2023. Il est néanmoins indiqué que les « cultures vivrières transformées », c'est-à-dire « *les cultures destinées à la consommation humaine qui ont fait l'objet d'un traitement préalable (c'est-à-dire cuisson ou transformation industrielle) et ne sont pas consommées crues* », peuvent se satisfaire d'une qualité B (≤ 100 *E.coli* UFC/100mL). Dans l'arrêté du 02/08/2010, les cultures transformées par un traitement thermique industriel adapté pouvaient se

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

satisfaire d'une qualité B (≤ 10 000 *E.coli* UFC/100mL). Les exigences pour les cultures vivrières transformées sont donc 100 plus strictes dans le nouvel arrêté. Un tel renforcement d'exigences vis-à-vis de ces cultures est questionnable, de même que la non-considération de cette mesure comme mesure *barrière* contrairement aux autres cadres normatifs. Son intégration pourrait permettre, par exemple, d'utiliser une qualité C (≤ 1 000 *E.coli* UFC/100mL) pour ces cultures. Une qualité qui reste 10 fois plus stricte que ce qui était autorisé dans l'arrêté de 2010. Dans le projet d'arrêté paru en 2022, ces mesures étaient déjà exclues de la liste des mesures envisageables. Le CES « Eaux » de l'Anses avait alors recommandé de les inclure, mais uniquement pour *« l'usage des industriels, et non à celui des consommateurs* » (Anses, 2023). Comme nous le verrons dans la dernière section consacrée à l'organisation, l'OMS intègre la cuisson à l'échelle du consommateur (WHO, 2006). Ces mesures n'ont néanmoins pas été intégrées dans l'arrêté final du 18/12/2023 comme mesure *barrière*.

Les références scientifiques utilisées par les cadres normatifs pour valider la contribution de ces mesures, nous avons étudié différentes références bibliographiques. La désinfection thermique est une des méthodes de désinfection les plus utilisés dans le secteur alimentaire (Espinosa *et al.,* 2020). En effet, les micro-organismes pathogènes sont sensibles à la température : une réduction >4 log en *E.coli* est atteinte pour 180 secondes à 90°C (Kharel *et al.* 2018 in Espinosa *et al.* 2020) et 7 log pour rotavirus à 60°C pendant 10min (Anses, 2012b). Des traitements thermiques supérieurs à 65°C permettent la destruction de campylobacter en quelques dizaines de secondes (Anses, 2021b). Le temps, la matrice considérée, la température ainsi que les micro-organismes considérés sont néanmoins des facteurs importants (Espinosa *et al.*, 2020). Concernant la désinfection par l'eau bouillante, c'est une méthode qui est approuvée pour réduire la concentration en micro-organismes pathogènes. L'Institut Pasteur indique, par exemple, qu'une minute d'ébullition suffit pour rendre l'eau potable.

- **Choix retenus pour le modèle**

Compte tenu de leur contribution non-négligeable, les mesures *barrières* « transformation » et « cuisson » ont été intégrées à la base de données malgré l'exclusion de l'AF du 18/12/2023. La réduction indiquée par les directives de l'OMS de 2006 et la norme ISO 16075-2 (2020) ont été retenues, soit une réduction de 6 log. Il a été considérée que ces mesures agissent sur la concentration en micro-organismes pathogènes et qu'elles concernent la voie « Produit ». Ces deux mesures ont été considérées comme deux mesures distinctes dans la base de données. En effet, elles ne font pas forcément appel aux mêmes procédés et que la cuisson peut être réalisée à l'échelle du consommateur (discuté en fin de section).

- **Besoins identifiés et évolutions possibles du modèle**

Comme indiqué par la littérature, la contribution de ces mesures dépend de différents facteurs comme le temps, la température ou encore le micro-organisme pathogène considéré. Il serait donc important de mieux spécifier le protocole associé à ces mesures.

i. Séchage

- **Recommandations des cadres normatifs et choix identifiés dans la littérature**

La norme ISO 16075-2 (2020) indique que le « séchage au soleil » des cultures fourragères et de semences contribue à une réduction de 2 à 4 log des micro-organismes pathogènes. Cette mesure n'est pas indiquée dans les directives de l'OMS et australiennes de 2006. Le RE 2020/741 et l'AF du 18/12/2023 l'indique pour le fourrage frais et le pâturage. Dans le projet d'arrêté, elle n'était pas mentionnée. Le CES « Eaux » de l'Anses avait recommandé son intégration en indiquant la condition

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

d'une formation et d'un accompagnement des utilisateurs des EUT (Anses, 2023). L'absence de cette mesure avait également été relevée par plusieurs contributeurs au projet d'arrêté :

> *« Cette barrière est en effet efficace et facile à mettre en œuvre pour l'exploitant agricole » (Chambres d'agriculture France)*

> *« Certaines barrières d'intérêt issues de ces mêmes lignes directrices ne sont pas citées (ex. Irrigation localisée, cuisson des produits, séchage au soleil après coupe, …) risquant de limiter celles auxquelles les porteurs de projet pourraient penser faire appel » (Groupe de Travail ENC de l'ASTEE).*

Cette mesure a donc été intégrée à l'AF du 18/12/2023. Il est intéressant de voir qu'elle n'est pas indiquée pour l'irrigation des cultures vivrières. C'est également le cas dans la liste proposée par la norme ISO 16075-2 (2020). Pourtant, dans le tableau de la norme ISO présentant des exemples de détermination du nombre et des types de barrières pour chaque groupe de cultures (Annexe A), le séchage « *à l'air prolongé* » est indiqué comme correspondant à 1 voire 2 *équivalent-barrières* pour certaines cultures vivrières : celles « *qui poussent dans le sol, qui peuvent être consommées après avoir été pelées (cacahouètes)* », « *qui poussent au-dessus du sol, qui peuvent être consommées après séchage et cuisson (poids secs, lentilles)* », « *produits de cultures ensemencées (céréales) consommés secs et cuits (blé, avoine, orge, riz) »*. Cette mesure pourrait donc être envisagée pour certains cultures vivrières.

En effet, le séchage solaire ou à l'air des cultures sont des techniques largement utilisées produire des cultures déshydratées (fruits secs, herbes, épices…) mais aussi comme moyen de conservation. La réduction de l'activité de l'eau inhibe la croissance de la plupart des bactéries ou des moisissures. Un séchage à air convectif à 62,8°C de pommes pendant 6h permet une réduction de 2,5-3,1 log UFC/g d'*E.coli* O157 :H7 (Tharrington *et al.* 2005 cité par Bourdoux *et al.,* 2016). De même, une réduction de 2-3 log en coliformes a été observée sur des oignons pour un séchage à air convectif à 70°C pendant 3,8 heures (Garcia *et al.,* 2010 cité par Bourdoux *et al.,* 2016). Le séchage à l'air libre permet d'exposer directement les micro-organismes pathogènes aux rayonnements UV et à la température. Néanmoins, les produits peuvent également être exposés à des facteurs de contamination extérieurs (Bourdoux *et al.,* 2016).

- **Choix retenus pour le modèle**

Bien que cette mesure ne soit pas indiquée par l'OMS dans ses directives de 2006 et que la littérature soit peu abondante, elle a tout de même été intégrée à la base de données. Les indications de la norme ISO 10675-2 (2020) et de l'AF du 18/12/2023 ont été reprises. Il a été considéré qu'elle pouvait également concerner les cultures vivrières répondant à la description indiquée par la norme ISO 16075-2 (2020) (mentionnées précédemment). C'est le cas, par exemple, de l'oignon qui est une culture vivrière qui pousse dans le sol et qui est consommée après être pelée.

La réduction indiquée par la norme ISO n'est cependant pas précise. Une plage de réduction est indiquée, de 2 à 4 log, selon « *le type de cultures et les conditions météorologiques ».* Aucune information n'est toutefois apportée au sujet des conditions qui influenceraient la réduction. En attente de données supplémentaires, une contribution de 2 log a été retenue pour l'ensemble des cultures qui peuvent subir un séchage à l'air libre ou mécanisé. Cette mesure *barrière* agit sur la concentration en micro-organismes pathogènes et concerne la voie « Produit ».

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

- **Besoins identifiés et évolutions possibles du modèle**

Cette mesure mériterait d'être mieux caractérisée pour définir les conditions optimales permettant une réduction suffisante des micro-organismes pathogènes (temps de séchage, température…). Il serait important également de distinguer les processus qui impliquent une déshydratation de ceux impliquant une dessiccation. En effet, les impacts sur les micro-organismes pathogènes seront différents. La dessiccation implique une perte presque totale de l'eau qui impacte plus fortement les micro-organismes pathogènes que la déshydratation. Néanmoins, certaines cellules ou spores peuvent rester viables (Bourdoux et al. 2016). La mise en place d'autres mesures peuvent alors être intéressantes pour réduire les risques comme le pelage ou le lavage.

ii. Pelage

- **Recommandations des cadres normatifs et choix identifiés dans la littérature**

L'OMS considère que le pelage des produits diminue la quantité de micro-organismes pathogènes de 2 log pour les « *fruits et les légumes racines* » (WHO, 2006). Cette même réduction est également indiquée : dans les directives australiennes (pour les « *produits* ») (NRMMC *et al.,* 2006), dans la norme ISO 16075-2 (2020) et le RE 2020/741 (pour les « *fruits et légumes racines* ») ainsi que dans l'AF du 18/12/2023 (pour « *fruits et légumes* »). Les références scientifiques ayant permis d'attribuer cette réduction n'ont pas été retrouvées. Aucune information n'est fournie par les cadres pour expliquer la spécification à certaines cultures.

La littérature est peu abondante sur la contribution du pelage mais quelques études ont été identifiées. Ainsi, Erickson *et al.* (2015) se sont intéressés à la contribution des brosses et des économes utilisés chez le consommateur pour réduire la concentration en *E.coli* 0157 :H7 et *Salmonella* sur différents produits consommés crus. Leur étude a montré que les réductions moyennes obtenues varient entre 0,25 et 2,75 log pour *E.coli* 0157 :H7 et 0,11 et 2,97 log pour *Salmonella.* Ces réductions vont échos à celles considérées par les cadres normatifs. Les auteurs indiquent que ces valeurs varient selon les ustensiles utilisés ainsi que les végétaux considérés. Erickson *et al.* (2015) ont également souligné que l'éplucheur peut être une voie de transfert des micro-organismes de la surface vers les tissus internes. Coupler cette mesure avec un rinçage à l'eau potable peut alors augmenter son efficacité (Gomez *et al.,* 2021) et réduire les risques de transfert. Pour les végétaux à feuille (choux, salades…) irrigués avec des eaux usées, Amoah *et al.* (2011) indiquent que retirer les feuilles extérieures réduit de 1 à 3 log la concentration en micro-organismes sur le produit. Cette réduction est néanmoins variable, elle dépend du produit considéré mais aussi de la proportion retirée. Par exemple, 1 log correspond à maximum 10% du poids (dans le cas du chou) (Akpe *et al.* 2009 et Abaidoo *et al.* 2010 cité par Amoah *et al.* 2011).

- **Choix retenus pour le modèle**

La réduction de 2 log a été retenue dans notre modèle. Il a été considérée que cette mesure contribue à réduire la concentration en microorganismes pathogènes pour la voie « Produit ». La contribution indiquée par Amoah *et al.* (2011) pour la suppression des feuilles extérieures n'a pas été intégrée. En effet, les micro-organismes pathogènes qui persistent sont souvent retrouvés au niveau du cœur des produits. C'est le cas notamment pour la laitue.

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

iii. Lavage et désinfection

- **Recommandations des cadres normatifs et choix identifiés dans la littérature**

L'OMS considère que le lavage « *à l'eau propre des salades, légumes et des fruits* » contribue à une réduction de 1 log. Par « *eau propre* », l'OMS entend une eau « *de boisson saine* ». Il est également précisé que le lavage à l'eau doit être « *énergique* », en particulier pour les cultures « *à surface irrégulière (laitues, persil) et les légumes destinés à être consommés crus* ». Cela permet d'atteindre une réduction d'au moins 1 log voir même 2 log dans le cas de cultures « *à surface lisse (concombres ou tomates par exemples)*. Pour un lavage « *avec une solution de désinfection peu puissante, puis un rinçage à l'eau propre* », la réduction est plus importante : 2 log. L'utilisation d'une solution de désinfection est recommandée en particulier pour réduire les risques associés aux œufs d'helminthes. Ces micro-organismes pathogènes adhèrent plus facilement aux surfaces des cultures. Différentes solutions sont indiquées dont l'hypochlorite de sodium (eau de javel). Néanmoins, l'OMS reconnait que la désinfection n'est pas toujours envisageable pour certaines cultures (WHO, 2006). Les directives australiennes n'intègrent pas le lavage et la désinfection des produits comme mesure *barrière* (NRMMC *et al.,* 2006). Dans la norme ISO 16075-2 (2020), le RE 2020/741 et l'AF du 18/12/2023, une réduction d'1 log est attribuée au lavage, qui doit être réalisé à l'eau potable. Une réduction de 2 log est atteinte grâce à la désinfection avec une solution légèrement désinfectante et un rinçage à l'eau potable. Aucune information n'est néanmoins indiquée sur la solution désinfectante concernée.

Pour valider les réductions attribuées à ces mesures, l'OMS s'est principalement basé sur les conclusions de Beuchat (1998). Cet auteur a réalisé une revue de littérature sur la contribution de différentes méthodes de décontamination des surfaces des végétaux. Ainsi, la réduction de 2 log attribuée à la désinfection provient de l'étude de Brackett (1987) portant sur la contribution du chlore pour l'inactivation de *Listeria monocytogenes* (bactérie). L'utilisation d'une solution de 200 ppm (mg/l) pendant 10 secondes pour désinfecter des choux de Bruxelles achève une réduction de 2 log UFC/g après une inoculation de 10^6 CFU/L. Beuchat (1998) indique que les effets des désinfectants varient selon les caractéristiques des végétaux, de la température mais aussi des micro-organismes considérés. *L. monocytogenes* est généralement plus résistante que d'autres bactéries comme *Salmonella ou E.coli O157 :H7.* La réduction de 2 log pourrait donc être supérieure selon les micro-organismes considérés. Il est également indiqué que la concentration en chlore est importante et qu'une concentration minimale de 50 ppm est nécessaire. Néanmoins, l'augmentation à 200 ppm n'apporte aucun effet additionnel. Il est précisé qu'un lavage vigoureux peut être aussi efficace qu'une désinfection à 200 ppm (1 à 2 log). Ce résultat est intéressant compte tenu des limites associées aux produits de désinfection : risques pour les utilisateurs, altération de la qualité du produit... (Beuchat, 1998). L'étude de Lang *et al.* (2004) a également été utilisée par l'OMS (2006). Les auteurs se sont intéressés à la désinfection par chloration de laitue et de persil. Ils ont estimé que 200mg/ml de chlore permettait d'atteindre une réduction de 1,1 à 1,8 log CFU/échantillon de laitue et une réduction plus élevée pour le persil, de 1,6 à 5 log UFC/échantillon. Les auteurs indiquent toutefois que le manque d'uniformité dans les méthodes de désinfection utilisées rend difficile l'estimation de la véritable efficacité de ces produits.

D'autres travaux ont été menées, en particulier en Afrique de l'Ouest, sur la contribution de ces mesures pour réduire les risques associés à l'utilisation d'eaux usées pour l'irrigation agricole depuis la parution des directives de l'OMS (Amoah *et al.,* 2011 et Drechsel *et al.,* 2011). Au niveau des marchés, le lavage à l'eau propre et le lavage à l'eau potable permettent respectivement une réduction 1 à 2 log et 2 à 3 log. Au niveau du consommateur, la désinfection suivie d'un rinçage à l'eau propre contribue à une réduction de 2 à 3 log (Amoah *et al.* 2007 ; Drechsel *et al.* 2010 cité par Amoah *et al.,* 2011). Ces résultats confirment ceux de Brackett *et al.* (1987) indiquant qu'un lavage à l'eau peut être

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

aussi efficace qu'une désinfection. L'étude de Pezzuto *et al.* (2016) indique également une contribution de 2 log de la concentration en Salmonella grâce à une solution de 200 ppm d'eau de javel. Ils indiquent également que, dans le cas d'une forte contamination du produit (10^7 UFC/g), l'eau de javel contribue à la plus grande réduction par rapport au lavage à l'eau ou à l'utilisation de vinaigre. Ce n'est néanmoins pas nécessairement le cas avec des plus faibles contaminations (10^3 UFC/g). Malgré la contribution de l'eau de javel, il est souligné que cette solution est hautement corrosive et qu'elle présente des risques pour la santé.

- **Choix retenus pour le modèle**

Pour notre base de données, nous avons retenu les réductions attribuées par l'AF du 18/12/2023 : une réduction de 1 log pour le lavage à l'eau potable et 2 log pour la désinfection. Ces mesures contribuent à réduire la concentration en micro-organismes sur les produits finaux. Elles concernent donc la voie « Produit ».

- **Besoins identifiés et évolutions possibles du modèle**

Dans ses recommandations sur le projet d'arrêté (2023), le CES « Eaux » de l'Anses indiquent que les conditions de la désinfection permettant d'atteindre la réduction de 2 log seraient à mieux spécifier. Cette demande de précisions a également été faite par certains contributeurs au projet d'arrêté dont le CTIFL[7] :

> *« car la mention ne doit pas laisser croire que tout utilisateur peut ajouter un désinfectant à son eau de lavage des fruits et légumes frais. La réglementation ne l'autorise que pour les fruits et légumes prêts à l'emploi ».*

La littérature mentionnée précédemment confirme également le besoin de mieux spécifier les conditions opératoires, les micro-organismes pathogènes considérés et les végétaux concernés.

Ces précisions n'ont pas été réalisées dans le cas de la thèse car cela nécessitait un travail de caractérisation trop important. Néanmoins, il serait intéressant de pouvoir intégrer les spécifications qui existent déjà sur les préparations post-récolte notamment dans la réglementation associée à la production alimentaire. Par exemple, dans l'*Arrêté du 19/10/2006 relatif à l'utilisation d'auxiliaires technologiques pour la fabrication de certaines denrées alimentaires*, une concentration maximale de 80 ppm en chlore libre du bain de désinfection pour les denrées alimentaires. Les indications du « Paquet Hygiène » pourrait également être reprises. Le *Paquet Hygiène* est un ensemble de règlements de la Commission Européenne sur les denrées alimentaires. Il s'applique « *à l'ensemble de la filière agroalimentaire, depuis la production primaire, animale et végétale jusqu'à la distribution au consommateur final, en passant par l'industrie agroalimentaire, les métiers de bouche, et le transport* » (MASA, 2024). Il intègre notamment le *Règlement n°852/2004 du Parlement européen et du Conseil du 29 avril 2005 relatif à l'hygiène des denrées alimentaires*. Ce texte fait partie des textes ayant contribué à l'AF du 18/12/2023. L'OMS et la FAO ont également publié un rapport sur la prévention et le contrôle des dangers microbiologiques dans les fruits et légumes frais, dont les spécifications seraient à intégrer (FAO & WHO, 2023).

En conclusion, les recherches ont confirmé la contribution non-négligeable des préparations post-récolte (cuisson, transformation, lavage, séchage, pelage, désinfection…) dans la réduction des risques associés à la réutilisation des EUT. Elles contribuent également à réduire les risques associés à d'autres sources comme l'environnement, la fertilisation… Elles sont donc essentielles à encourager. Comme

[7] *Centre Technique Interprofessionnel des Fruits et Légumes qui est le référent de recherche appliquée au service de la filière fruits et légumes, de la production à la distribution*

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

indiqué par l'Anses, la sécurité sanitaire des alimentaires doit être réalisée *« de la fourche à la fourchette* » (Anses, 2021a). Leur intégration dans la gestion des risques pour la REUT amène néanmoins à repenser les limites du système et les acteurs concernés. Elle soulève donc des interrogations concernant l'organisation de cette gestion. Nous aborderons cet élément après la prochaine section qui est consacrée à la dernière catégorie de notre base de données.

1.3.5 Mesures assurant le fonctionnement du système global et autres mesures (S)

Les mesures mentionnées précédemment sont de différentes natures. Elles peuvent concerner des équipements ou bien des pratiques. Leur contribution repose sur des processus physiques, biologiques, chimiques mais aussi sur des pratiques ou choix individuels. Pour s'assurer du fonctionnement global du système, il est important de valider ses mesures dans leur conception et leur mise en place mais aussi de les surveiller pour s'assurer de leur bon fonctionnement, de leur respect ou encore de leur maintien à long terme. L'OMS (2006) consacre un chapitre entier à la surveillance et à l'évaluation du système. La surveillance a trois objectifs :

- la validation qui prouve que le système répond aux exigences de conception comme les critères de dimensionnement qui assurent les performances des mesures ;
- la surveillance opérationnelle pour fournir des informations sur le fonctionnement des différents mesures de protection ;
- la vérification qui permet de s'assurer que le système répond aux objectifs fixés (WHO, 2006).

Contrairement à la surveillance opérationnelle ou la vérification, la validation est une étape initiale. Elle peut faire appel à des paramètres qui ne se prêtent à une surveillance opérationnelle. C'est le cas, par exemple, des exigences de suivi microbiologiques qui peuvent être adaptés entre la validation et la surveillance régulière.

Avec l'intégration des mesures post-traitement, d'autres mesures sont essentielles pour surveiller leur fonctionnement mais surtout encourager leur mise en place et leur respect comme la formation et la sensibilisation. La surveillance peut également concerner les populations exposées grâce au suivi médical des professionnels ou aux études épidémiologiques. Cet ensemble assure un bon fonctionnement global du système mais aussi l'identification d'éventuelles défaillances. Ces mesures vont être présentées dans les prochaines sections.

1.3.5.1 Suivi et communication entre les acteurs

La qualité de l'eau réutilisée est un des facteurs clés dans la gestion des risques. Il est donc important de connaitre sa composition pour évaluer les risques associés. Les eaux usées sont composées d'une grande variété de micro-organismes. Cette composition varie aussi bien spatialement que temporellement puisqu'elle dépend de nombreux facteurs comme l'état sanitaire des populations, les saisons, les caractéristiques du réseau… Comme il n'est pas possible de suivre l'ensemble de ces micro-organismes pour des raisons opérationnelles mais aussi économiques, des indicateurs sont généralement définis pour renseigner la contamination fécale des eaux réutilisées. Les indicateurs et les méthodes utilisées pour réaliser ces analyses ne seront pas présentés en détail car la littérature est abondante sur le sujet. Néanmoins, il est nécessaire d'aborder certains éléments concernant cette mesure sur laquelle la gestion des risques de nombreux cadres normatifs repose.

Les indicateurs de contamination fécale sont des organismes qui ne présentent pas nécessairement de risques pour la santé humaine mais qui indiquent la présence des micro-organismes pathogènes. Plusieurs caractéristiques clés définissent un indicateur « idéal » :

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

- il est présent lorsqu'il y a une contamination et en quantité supérieure ou égale à celle du ou des autres organismes cibles ;
- son identification et sa culture sont simples, rapides et moins coûteuses et ne présentent pas un risque sanitaire trop important pour le personnel de laboratoire ;
- il est résistant aux stress environnementaux et aux traitements de manière au moins équivalente voir légèrement supérieures que les organismes cibles.).

Il n'existe néanmoins pas d'indicateur idéal remplissant l'ensemble de ces caractéristiques. La bactérie *E.coli,* qui est largement utilisée comme indicateur dans les cadres normatifs, présente plusieurs intérêts dont celui d'être facilement analysable. Cependant, elle est facilement inactivée par les procédés de traitement (WHO, 2006 ; Carré *et al.,* 2017). Pour les virus et les protozoaires, d'autres indicateurs sont alors préférés comme les bactériophages (coliphages ARN-F spécifiques par exemple) ou encore les spores des bactéries anaérobies sulfito-réductrices (Carré *et al.,* 2017). Leur absence n'est néanmoins pas toujours synonyme d'une absence de risques. A l'échelle mondiale, il n'existe pas de consensus sur le choix des micro-organismes à analyser (indicateurs, micro-organismes pathogènes…) de même que sur les seuils à atteindre, la méthodologie à utiliser (méthodes de cultures, biochimiques, moléculaires…), la méthode de calcul (moyenne, médiane, 95ème percentile…) ou encore la fréquence des analyses (journalière, hebdomadaire, mensuelle…) (Angelakis *et al.,* 2018 ; Shoushtarian & Negahban-Azar, 2020 ; McLennan *et al.,* 2024).

L'AF du 18/12/2023 reprend les indications du RE 2020/741 en terme de surveillance. Deux types de surveillance sont exigés : une surveillance de validation permettant de valider la filière de traitement et une surveillance de routine. Des objectifs de performance de la chaine de traitement sont associés à la surveillance de validation (Tableau 21). Pour le suivi en routine, seul le suivi d'*E.coli* est requis dans le RE 2020/741 ainsi que Legionella spp. en cas d'irrigation par aspersion et les nématodes intestinaux en cas d'irrigation des pâturages et des fourrages frais. Comme indiqué en début de ce chapitre, les limites du RE 2020/741 associées à l'absence d'un suivi en routine pour les virus et les protozoaires a été soulignée dans la littérature (Dingemans *et al.,* 2020). Le suivi est plus poussé dans l'AF du 18/12/2023 puisque le suivi des trois types est exigé. Les coûts associés aux analyses ne sont pas indiqués dans les directives de l'OMS ni dans les autres cadres normatifs. Or ces coûts peuvent être conséquents en particulier pour la qualité A dont les fréquences d'analyses sont plus élevées que pour les autres qualités.

Ces coûts ont donc été intégrés dans notre base de données en se basant sur des données du terrain. Ils varient selon les micro-organismes / indicateurs analysés : de la vingtaine d'euros par échantillon pour *E.coli* à la centaine d'euros pour les bactériophages ARN-F spécifiques et les œufs d'helminthes. Un exemple d'une estimation a été faite dans le cas d'un besoin en qualité A sur une campagne d'irrigation de 5 mois (Tableau 21).

Micro-organisme/Indicateur	Surveillance de validation	Fréquence de l'échantillonnage (nombre/mois)	Total par échantillon (€)	Total par mois (€)	Total pour 5 mois (€)
E.coli	≥ 5 log	4	27	107	535
Bactériophage ARN-F spécifique	≥ 6 log	4	241	965	4 826
Clostridium perfringens	≥ 4 log	4	9	35	175
Œufs d'helminthes	≤ 1 œuf/L	2	111	111	1 115
Legionella spp	< 1 000 UFC/L	2	60	120	600
Frais annexes(1)	-	-	-	-	644
Total	-	-	-	**1 450**	**7 894**

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

<u>Légende</u> : (1) = les frais annexes représentent les coûts de déplacements et de prélèvements, de flaconnage ainsi que de prise en charge du dossier

Tableau 21 : Estimation des coûts associés au suivi microbiologique de routine dans le cas d'une qualité A exigée

L'estimation réalisée précédemment peut correspondre à une sous-estimation du total. En effet, l'AF du 18/12/2023 indique également la possibilité de mettre en place « *des points de conformité complémentaire* » définis comme « *des points de conformités situés au plus proche du lieu d'utilisation des eaux usées traitées. Ces points peuvent être positionnés en sortie de réservoir de stockage ou du réseau de distribution des eaux entre la sortie de la station de traitement des eaux usées et la limite de la parcelle irriguée* ». Ces points peuvent ajouter des coûts d'analyse supplémentaires. Les points de conformité en limite de la parcelle irriguée soulève également des interrogations compte tenu des surfaces irriguées qui peuvent aller jusqu'à plusieurs centaines d'hectares (Lombard-Latune & Bruyère,2023). Les contributeurs au projet d'arrêté ont également exprimé des inquiétudes vis-à-vis de ce renforcement du suivi de routine :

> *« Globalement la complexification de la gestion des dossiers et le renchérissement des modalités de surveillances vont alourdir les projets, notamment dans le cas des petites collectivités équipées d'installations de faible taille, à faibles budgets d'exploitation, et notamment dans le cas des qualités A et B (arrosage des cultures) à programmes de suivis lourds et fréquents. Alors que des opportunités de REUT notamment en irrigation agricole sont souvent envisageables, le milieu semi urbain et rural risque d'être pénalisé dans ces projets, aussi bien pour ceux à venir que pour les dossiers en cours qui devront être mis en conformité » (Fédération Professionnelle des Entreprises de l'Eau).*

Au-delà des coûts économiques associés au suivi microbiologique, d'autres limites sont également indiquées dans la littérature. En effet, un délai est généralement observé entre l'identification d'éventuels dysfonctionnement comme l'augmentation de la charge microbiologique par exemple et l'obtention des résultats. Un délai entre l'identification et la réaction pour gérer cette défaillance est donc observé (Drechsel *et al.,* 2022). Cela interroge donc sur les risques sanitaires qui sont associés à ces délais. Ces éléments confirment donc les limites d'un suivi uniquement basé sur les analyses microbiologiques et l'intérêt d'une approche systémique des risques.

Bien que les coûts économiques soient une limite pour les projets, d'autres analyses sont également intéressantes comme les analyses microbiologiques sur les cultures irriguées ainsi que les études épidémiologiques (WHO, 2006 ; Gil *et al.,* 2015). Comme mentionné dans ce chapitre, ces études fournissent des éléments essentiels pour l'évaluation des risques. Une étude a été menée à Clermont-Ferrand à la fin des années 90 sur les populations vivant à proximité des périmètres et sur les travailleurs agricoles (Devaux *et al.,* 2001). A l'époque, les qualités indiquées par le CSHPF étaient de 1 000 CF /100mL. Malgré certaines limites liées à leur étude, les auteurs avaient indiqué qu'aucune augmentation du taux de déclaration des maladies pathologiques associées à la REUT n'avait été identifiée. Ils avaient également comparé différents périmètres irrigués, certains avec les EUT produites par les lagunes et d'autres avec différentes eaux de surface. Ils avaient montré que la concentration moyenne des eaux de surface étaient équivalentes aux effluents secondaires de la station d'épuration. Ainsi, ils seront intéressants de pouvoir actualiser les données de l'étude épidémiologique ainsi que pouvoir comparer les périmètres utilisant des eaux de REUT et ceux utilisant des eaux de surface. L'OMS recommande également le suivi médical des professionnels et la vaccination (WHO, 2006). Une mesure qui n'a pas été retrouvée dans les cadres normatifs bien qu'elle soit retrouvée pour les professionnels des stations d'épuration par exemple. Comme indiqué par le RE 2020/741, des systèmes appropriés de gestion des incidents et des situations d'urgence doivent être définis comme par exemple des procédures permettant d'informer toutes les parties concernées si des défaillances surviennent. Elles doivent donc être décidées avec l'ensemble des acteurs concernés

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

pour pouvoir identifier les moyens les plus efficaces possibles. L'ensemble de ces mesures a été intégrée à la base de données.

1.3.5.2 Formation et sensibilisation

Comme indiqué dans ce chapitre, certaines mesures font appel à la responsabilité individuelle comme le port d'EPI, les contraintes de distance mises en place par les professionnels ou encore le respect des panneaux de signalisation par les non-professionnels. Comme indiqué par le RE 2020/741, l'éducation et la formation des utilisateurs finaux « *revêtent une importance majeure en tant que composantes de la mise en œuvre et du maintien de mesures préventives* ». Le CES « Eaux » recommande également la formation et l'accompagnement en particulier des utilisateurs des EUT (Anses, 2023). Une sensibilisation aux risques sanitaires et à l'intérêt des mesures barrières pourrait contribuer à leur application (WHO, 2006 ; Drechsel *et al.,* 2011). Néanmoins, aucune information ou support n'a été identifié pour accompagner la formation ou la sensibilisation des professionnels et des non-professionnels. Au-delà de la construction des scénarios de gestion, le modèle d'évaluation et la base de données pourraient donc être des vecteurs de transmission des connaissances mais aussi un support pour la formation et la sensibilisation des opérationnels mais aussi des acteurs institutionnels et de la société civile. Un intérêt qui sera confirmé lors son utilisation sur les cas d'étude (Chapitre 3).

1.3.6 Organisation et mise en œuvre des mesures barrières

- **Recommandations des cadres normatifs et choix identifiés dans la littérature**

Dans ses directives, l'OMS intègre différents acteurs dans la gestion des risques au-delà des responsables de la filière de traitement : les agriculteurs mais aussi les distributeurs, les restaurateurs et les consommateurs. En effet, les études sur le terrain ont montré que des contaminations pouvaient avoir lieu au niveau de ces maillons, ces acteurs jouent donc un rôle essentiel (WHO, 2006). L'intégration de l'ensemble de ces acteurs est plus floue dans les directives australiennes. Les mesures *cuisson* et *transformation* sont intégrées pour certaines cultures (céréales, raison viticole…). Le *pelage avant consommation* est indiqué mais pas les mesures *lavage* et *désinfection* (NRMMC *et al.,* 2006).

Cette intégration est également floue dans la norme ISO 16075-2 (2020), dans le RE 2020/741 et dans l'AF du 18/12/2023. En effet, l'AF du 18/12/2023 définit une « *partie prenante aux barrières* » comme étant un « *opérateur professionnel de la chaîne alimentaire désigné comme devant mettre en œuvre une barrière spécifique sur les végétaux produits au-delà de celles relevant de la responsabilité directe du producteur, du stockeur, du distributeur ou de l'utilisateur des eaux usées* ». Au final, la contribution des professionnels post-récolte est considérée dans l'évaluation des risques et ils sont intégrés comme acteur de la gestion. Les conditions de leur mise en œuvre garantissant l'efficacité des mesures post-récolte doivent être spécifiées. D'autres mesures doivent être associées comme des justificatifs avec la traçabilité des produits ainsi que l'information, la formation et l'accompagnement des professionnels (Anses, 2023). Concernant les non-professionnels, leur intégration comme acteur de la gestion des risques est exclue par l'AF du 18/12/2023. Il est, en effet, indiqué que ces mesures doivent être réalisées « *avant leur vente aux consommateurs* ». Cette exclusion est retrouvée dans la norme ISO 16075-2 (2020). Néanmoins, si elle précisée pour le lavage et la désinfection, elle ne l'est pas pour le pelage et la cuisson. Autre exemple, dans l'AF du 18/12/2023, les cultures vivrières transformées sont définies comme « *cultures destinées à la consommation humaine qui ont fait l'objet d'un traitement préalable (c'est-à-dire cuisson ou transformation industrielle) et ne sont pas consommées crues)* ». Le terme « *industrielle* » est employé au singulier, ce pourrait laisser envisager que la cuisson n'est pas nécessairement industrielle. Cela amène donc à certaines confusions, qui ont été exprimées par des contributeurs au projet d'arrêté :

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

« *Comment interpréter ce tableau pour les légumes consommés cuits par les consommateurs (mais pouvant être commercialisée à l'état brut sans traitement de cuisson) ? Exemple : la pomme de terre peut-elle être qualifiée de culture vivrière transformée, éligible à une irrigation par une eau de qualité B sans mesure barrière additionnelle ?* » (Contributeur anonyme).

L'intégration du consommateur comme acteur de la gestion soulève des questionnements. En effet, la troisième étude INCA de l'Anses (2017) a montré que ces mesures de préparations des produits sont largement appliquées à l'échelle du consommateur puisqu'il a été estimé que plus de 90% des individus interrogés lavent, essuient ou épluchent les fruits et légumes avant de les consommer crus ou cuits. Néanmoins, cette étude indique également que ces pratiques varient selon les produits considérés et les individus interrogés. Il y a donc un facteur de variabilité non-négligeable. En effet, les consommateurs ne sont pas toujours au courant de leur rôle dans la prévention des maladies alimentaires et peuvent sous-estimer les risques associés (Pezzuto *et al.,* 2016). Ainsi, comme l'indique l'Anses, aucune garantie ne peut être apportée sur la mise en œuvre effective de ces mesures même en cas d'information préalable (Anses, 2023).

L'atteinte d'une qualité très stricte n'est néanmoins pas nécessairement une garantie pour assurer la sécurité du consommateur. Il est nécessaire de prendre en compte d'éventuelles contaminations dans une cuisine domestique au cours de la préparation des aliments (WHO, 2006). Ainsi, l'Anses estime qu'environ un tiers des foyers de toxi-infections collectives d'origine alimentaire déclarés surviendrait dans le cadre familial. La préparation finale et le lieu de consommation sont donc reconnus comme faisant partie des potentielles sources de contamination, au même titre que la production primaire, la transformation, la distribution ou encore la commercialisation. La sécurité alimentaire « de la fourche à la fourchette » est vivement encouragée (Anses, 2022). Les préparations post-récolte sont importantes dans la gestion des risques liés à la REUT mais également pour ceux liés aux micro-organismes pathogènes présents dans l'environnement. Car comme indiqué par Beuchat (1998), les environnements agricoles ne sont pas et ne peuvent pas être aseptisés. Il est important de considérer d'autres risques comme les amendements par exemple (Amoah *et al.,* 2011 ; Bozkurt *et al.,* 2021).

Drechsel *et al.* (2011) confirment qu'il est effectivement difficile de contrôler le comportement du consommateur. Néanmoins la sensibilisation aux risques peut être un élément déclencheur fort pour la mise en place de mesures de gestion à leur échelle compte tenu des effets directs et immédiats sur leur propre santé. C'est une mesure qui sera présentée dans la section suivante.

En conclusion de ces éléments, réduire la contribution de la REUT à l'introduction de micro-organismes pathogènes sur les cultures qui seront consommées est important. Néanmoins, la prise en considération de la contribution des préparations post-récolte, et plus largement des autres mesures présentées précédemment, semble nécessaire dans l'évaluation risques/bénéfices en particulier pour définir la qualité à atteindre. Elles permettent également la gestion d'éventuelles défaillances des autres mesures. Par exemple, la norme ISO 16075-2 (2020) précise qu'il est interdit de récolter les fruits tombés au sol. Néanmoins, la chute de fruits est inévitable (Mara & Horan, 2003). Cette mesure semble difficile à contrôler mais aussi à appliquer compte tenu des pertes potentielles. Les préparations post-récolte ont alors un rôle clé. Il semble nécessaire que la vision systémique encouragée par les stratégies comme « la fourche à la fourchette » doit être appliquée pour la REUT (Anses, 2021a).

- **Choix retenus pour le modèle**

Le choix a donc été fait de considérer ces mesures barrières dans la base de données sans préciser leurs conditions d'application, afin de mettre en discussion ces éléments avec les acteurs concernés. Ces éléments seront abordés dans le chapitre 3.

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

- **Besoins identifiés et évolutions possibles du modèle**

Pour réaliser leur QMRA et calculer les risques pour les consommateurs associés à la REUT, Mok *et al.,* (2014) intègre des facteurs de variabilité associés à la mise en place des mesures par les consommateurs. Il serait intéressant de pouvoir considérer ces éléments dans notre modèle.

1.3.7 En conclusion, un large ensemble de mesures envisageables pour réduire les risques microbiologiques rassemblées dans une base de données et intégrées au modèle

Les cadres normatifs proposent un ensemble de mesures de gestion envisageables pour réduire les risques associés aux micro-organismes pathogènes pour la REUT. La plupart des mesures validées par l'AF du 18/12/2023 proviennent des directives de l'OMS (2006) et les directives australiennes. Néanmoins, nous avons vu que certaines mesures sont exclues comme la cuisson des produits. Nous avons fait le choix de constituer une base de données exhaustive à partir de ces cadres.

Concernant les réductions log attribuées aux mesures *barrières*, une précision des contributions des mesures a été réalisée. En effet, les mesures n'agissent pas de la même manière sur les risques. Certaines contribuent à réduire la concentration en micro-organismes pathogènes dans les eaux qui seront réutilisées. C'est le cas, par exemple, des procédés de traitement. D'autres réduisent la concentration sur les différents vecteurs de contamination comme les cultures irriguées, le sol, l'air ou les produits finaux. C'est le cas de l'attente d'un temps de dépérissement naturel. D'autres contribuent à empêcher l'exposition de certaines populations exposées, comme les systèmes d'irrigation localisés, ou encore à réduire les volumes auxquelles ces populations pourraient être exposées. Les réductions log attribuées par les cadres normatifs sont parfois différentes. C'est le cas par exemple pour les systèmes d'irrigation en goutte à goutte. Nous avons fait le choix de reprendre généralement les réductions attribuées par l'AF du 18/12/2023. Ces réductions se basent sur la norme ISO 16075-2 (2020), reprenant elles-mêmes des données des directives de l'OMS (2006) et australiennes (2006). La plupart des références scientifiques qui ont permis d'attribuer ces réductions log sont antérieures aux années 2000. Nos recherches ont été étendues à des études scientifiques plus récentes qui ont mis en évidence un besoin d'actualisation des données mais aussi de précision. Ces précisions sont d'autant plus importantes que les réductions associées sont un facteur d'influence important pour la QMRA et plus largement pour l'évaluation des risques. Pour certaines mesures, comme le port d'EPI ou la mise en place de panneaux, une réduction log n'a pas pu être attribuée. Leur contribution repose sur la responsabilité individuelle. Il est donc nécessaire que leur mise en œuvre soit discutée avec les acteurs concernés.

Au-delà de leur contribution à la réduction des risques, l'état de l'art a mis en évidence des impacts non négligeables associés aux mesures *barrières* comme les impacts économiques, techniques, organisationnels mais aussi sociaux. Les mesures *barrières* fonctionnent généralement en association. Pour que la combinaison fonctionne, des mesures plus « sociales » que techniques sont également importantes telles que la formation et la sensibilisation des acteurs concernés.

1.4 Conclusion du chapitre 1 : la production d'un modèle d'évaluation et de gestion des risques

Lors de ce premier chapitre, nous nous sommes tout d'abord intéressés aux différentes approches de gestion des risques envisagées par les cadres normatifs et en particulier par les directives de l'OMS. L'objectif était de comprendre les raisons qui ont amené l'OMS à d'abord s'affranchir d'une classe de qualité unique pour proposer plusieurs classes selon les usages, puis à s'affranchir complètement de ces classes de qualité pour proposer des objectifs liés à la santé. Cette première section nous a permis

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

de voir l'importance des données microbiologiques mais également des données épidémiologiques et de considérer la dose d'exposition dans l'évaluation des risques. Nous nous sommes ensuite intéressés aux méthodologies d'évaluation des risques. Nous avons vu que plusieurs méthodologies étaient envisageables dont la *Quantitative Microbial Risk Assessment* (QMRA), qui permet de réaliser une évaluation quantitative des risques. C'est une méthodologie plus précise que les méthodes d'évaluation qualitatives ou semi-quantitatives car elle se base sur des données scientifiques. De plus, elle permet d'intégrer les spécificités propres à chaque micro-organisme pathogène mais aussi de considérer d'autres facteurs clés comme la dose d'exposition et la fréquence.

Grâce aux informations fournies par les cadres normatifs et la littérature, un modèle QMRA a été construit. C'est un modèle simplifié et générique qui permet de réaliser des évaluations des risques à partir des scénarios d'exposition que nous avons identifiés dans la littérature. Il nous permettra de tester cette méthodologie avec des acteurs du terrain et sa contribution pour la construction de la gestion des risques. Les paramètres proviennent d'études scientifiques mais des hypothèses ont également été faites lorsque les données n'étaient pas disponibles. Des incertitudes persistent sur certaines des données. Néanmoins, l'objectif du modèle n'est pas de fournir une analyse précise des risques mais de pouvoir aborder des éléments clés liés à l'évaluation des risques et de construire des scénarios de gestion à partir basée sur la dose d'exposition plutôt qu'uniquement sur la qualité comme le préconise l'OMS. L'état de l'art sur la QMRA a permis d'identifier les évolutions du modèle qui seraient nécessaires pour intégrer les variabilités et les incertitudes associées aux paramètres mais aussi envisager son utilisation avec des données réelles.

Une base de données a également été construite pour proposer un ensemble de mesures envisageables pour réduire les risques. Elle a été établie à partir des éléments fournis par plusieurs cadres normatifs. Cet état de l'art a permis d'identifier i) certaines contradictions entre ces cadres que ce soit sur les mesures proposées ou les réductions log associées mais aussi ii) des besoins de mieux caractériser les contributions à la réduction des risques mais aussi les coûts économiques associés et iii) une besoin d'actualisation des données. Les contributions à la réduction des risques ont été précisées et certains coûts ont été caractérisés. Il n'a pas été possible de le faire pour l'ensemble des mesures et des questions persistent sur plusieurs mesures barrières. Les impacts environnementaux n'ont également pas été caractérisés. Néanmoins, cela a produit une première base de connaissances intéressante.

Nous avons donc rassemblé un ensemble de connaissances et une méthodologie dans un modèle d'évaluation et de gestion. Ce modèle a pour objectif d'accompagner la construction de la gestion des risques microbiologiques. Il s'agit désormais de le transférer aux acteurs du terrain. La construction du modèle nous a toutefois permis d'identifier des incertitudes pour certains paramètres ainsi qu'un besoin d'informations du terrain pour d'autres. Ainsi, nous pouvons donc nous demander, comment transférer le modèle et accompagner son utilisation pour la construction de la gestion des risques microbiologiques. L'état de l'art a également montré l'importance de l'apport de connaissances du terrain par les différents acteurs concernés par la gestion des risques. C'est le cas notamment des utilisateurs des EUT en particulier dans le cas d'une approche *multi-barrières*. Ainsi, quelle méthodologie pourrait permettre ce transfert mais aussi l'appropriation et l'adaptation du modèle par l'ensemble des acteurs concernés ? Et donc plus largement, quelle méthodologie pourrait être mobilisée pour collectivement la gestion des risques microbiologiques ? C'est le sujet du deuxième chapitre que nous allons maintenant aborder.

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

2 Chapitre 2 - La co-construction d'un outil de simulation participative

Ce chapitre est consacré à la démonstration de la pertinence d'une construction collective de la gestion des risques microbiologiques et de la mobilisation des approches participatives comme méthodologie pour accompagner cette construction.

Dans son rapport pour accompagner l'établissement du plan de gestion des risques exigé par le RE 2020/741, le *Joint Research Center* (JRC) de la Commission Européenne indique la nécessité des espaces multi-acteurs et incite à la « participation » des parties prenantes à travers la mobilisation de différents outils : campagnes de sensibilisation ciblées, consultation, implication dans la planification et la prise de décision… (Maffettone & Gawlik, 2022). Ainsi, dans une première partie, nous verrons que la participation des différents acteurs impliqués ou concernés par les projets de REUT est vivement encouragée dans les cadres normatifs encadrant la pratique ainsi que dans la littérature portant sur le sujet. Nous verrons, qu'au final, les approches participatives sont assez peu utilisées dans la pratique, notamment en France (Noury, 2021). Ces approches présentent pourtant un intérêt particulier pour la gestion des risques microbiologiques pour la REUT et pour la pratique en général. En effet, elle mobilise un large panel d'acteurs dont les attentes, les besoins mais aussi les perceptions sont parfois différentes et divergentes et doivent être confrontées. Nous verrons néanmoins que les comportements des acteurs sont incertains. Ils interagissent dans un système qui s'avère d'autant plus complexe qu'il est composé d'un ensemble plus ou moins hétérogène d'éléments qui s'enchevêtrent et dont la dynamique est difficile à prévoir.

De manière générale, la participation est une « notion polysémique en vogue » (Barnaud, 2008). Nous nous intéresserons aux définitions qu'elle recouvre mais aussi aux approches participatives qui peuvent être mobilisées. Nous verrons que différents outils existent et que les niveaux de participation et d'implication des parties prenantes associés diffèrent. Nous montrerons que les démarches de modélisation participative, et notamment la modélisation d'accompagnement (Etienne, *et al.,* 2009), présentent un intérêt particulier pour appréhender les systèmes complexes, encourager le partage des représentations et favoriser l'apprentissage collectif. Elles contribuent à la production par les acteurs d'un système d'un modèle qui peut ensuite être implémenté sous la forme d'un outil de simulation participative. Nous verrons comment la simulation participative nous semblait pertinente pour la construction collective de la gestion des risques microbiologiques.

La deuxième partie sera donc consacrée à la mise en œuvre d'une démarche d'accompagnement pour co-construire un outil qui permet aux acteurs d'un cas de REUT de créer, simuler et tester collectivement différents scénarios de gestion des risques. Cette co-construction s'est faite avec une partie des acteurs du cas de Clermont-Ferrand, un cas emblématique de la REUT agricole en France. Elle a permis de discuter et enrichir le modèle d'évaluation et de gestion des risques présenté dans le chapitre 1, mais aussi de construire une représentation partagée du système de REUT de Clermont-Ferrand sous forme d'un « modèle conceptuel ». Nous verrons que ces éléments nous ont permis de produire un outil de simulation participative sous forme d'un jeu de rôles, appelé Multiware.

Dans une troisième partie, nous nous intéresserons à l'utilisation de l'outil lors d'ateliers participatifs réalisés avec différents cas d'étude au-delà du cas de Clermont-Ferrand. Nous verrons que certains paramètres de l'outil ont été adaptés chemin-faisant : en fonction des terrains d'étude mais aussi des évolutions réglementaires et des avancées des recherches bibliographiques. Nous présenterons également l'organisation définie pour chaque atelier et terminerons par la présentation de la méthode de suivi-évaluation du dispositif que nous avons élaborée.

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

2.1 Mobiliser les approches participatives pour construire collectivement la gestion des risques

Dans cette première partie, nous allons donc nous intéresser à la mobilisation des approches participants pour la REUT. Comment sont-elles abordées dans les cadres normatifs ? Quels sont les moyens de mise en œuvre proposés ? Après avoir brièvement abordé ces questionnements, nous tenterons d'analyser cette mobilisation, d'identifier des outils à mobiliser ainsi que d'éventuels besoins.

2.1.1 La participation, un concept dominant dans la gestion des ressources mais encore assez peu mobilisé pour la REUT

2.1.1.1 Une mobilisation encouragée par les cadres normatifs pour la REUT agricole

Dans cette section, nous nous intéressons aux différents cadres normatifs analysés pour la construction du modèle d'évaluation et de gestion présenté au Chapitre 1 (directives de l'OMS, australiennes, RE 2020/741, AF du 18/12/2023…). Nous tentons d'identifier d'éventuelles prescriptions concernant la mobilisation des approches participatives pour la REUT agricole de manière générale et également pour la gestion des risques : acteurs à impliquer, méthodes à utiliser, objectifs visés… Nous essaierons de faire un parallèle entre ces prescriptions et des exemples d'application sur le terrain identifiés dans la littérature. L'objectif est d'identifier des méthodologies participatives qui seraient éventuellement intéressantes à mobiliser construire collectivement la gestion des risques mais aussi d'identifier des besoins. Nous résumerons ces éléments pour chaque cadre normatif, pour ensuite conclure sur les indications fournies par les différents cadres ainsi que les besoins identifiés.

- **Directives de l'OMS (WHO, 2006)**

Dans ses directives de 2006, l'OMS consacre un chapitre à la *Planification et la mise en œuvre.* En introduction de ce chapitre, il est indiqué que *« les stratégies de planification doivent prévoir des volets concernant la communication avec les parties prenantes, les interactions avec elles et la collecte et l'exploitation des données* ». Ainsi, l'OMS encourage la participation des parties prenantes concernant différents aspects des projets de réutilisation des eaux usées.

Par exemple, la participation active des communautés locales à la planification et à la mise en œuvre des projets est « souhaitable ». En effet, l'utilisation des eaux usées bénéficie aux populations à travers la production de produits alimentaires. Néanmoins, elles peuvent également être exposées aux dangers microbiologiques ou chimiques potentiellement présents dans les eaux usées. Ces populations apportent des connaissances et des informations importantes, en particulier pour rapporter des problèmes de santé associés à l'utilisation des eaux usées. Leur participation contribue donc à la collecte de données. Elle est également encouragée pour assurer la mise en œuvre et la pérennité des projets à travers « l'acceptation » des projets par les communautés locales. En effet, la perception des projets de réutilisation des eaux usées par le public peut amener à leur blocage. Différents facteurs influencent cette acceptation au-delà de l'importance du besoin vis-à-vis de l'utilisation des eaux usées. Par exemple, elle est généralement facilitée lorsque la population est convaincue que le contact avec les eaux usées sera limité. La connaissance de la qualité de l'eau utilisée ou encore la confiance envers les gestionnaires sont également des facteurs d'influence. Ainsi, l'OMS indique que l'éducation et l'apport d'information, à travers les articles de journaux, les conférences ou encore des

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

présentations, sont des outils importants. Pour accroître leur « participation aux décisions », des réunions d'information, des enquêtes ou encore des questionnaires peuvent être mobilisés. Ces outils contribuent à l'examen des décisions par les populations et à recueillir leur réaction. L'OMS indique néanmoins que les retours d'expérience ont montré qu'une implication active des populations, de la phase de planification à la mise en œuvre est essentielle pour garantir cette acceptation. Ainsi, la participation des communautés locales aux décisions peut être renforcée grâce un dialogue interactif à travers des ateliers, des groupes de travail ou encore des comités. L'OMS indique que le passage par des organisations locales peut faciliter le relais de l'information auprès des populations mais aussi la collaboration et la mise en discussion des mesures de gestion retenues dans les programmes d'utilisation des eaux usées.

La participation des agriculteurs est également indiquée par l'OMS comme une composante clé de la planification et de la mise en œuvre des projets, en particulier pour l'application des mesures *barrières*. Par exemple, dans le cas de la mise en place de restrictions d'usage, « *il importe que les planificateurs et les concepteurs de schémas d'irrigation restreinte fassent participer, à un stade précoce, les agriculteurs locaux au processus de planification pour* ***recueillir leur avis*** *et déterminer quelles cultures « soumises à restriction » il sera possible de cultiver avec un profit raisonnable* ». Dans cet exemple, l'implication des agriculteurs semble encouragée après que la décision de mettre en place des restrictions sur les usages ait été prise. L'OMS indique également qu'il peut être « *plus productif de travailler avec les agriculteurs en utilisant comme intermédiaires des personnels d'encadrement qui* ***leur enseigneront*** *les mesures de protection sanitaire et les stratégies de réduction des risques* ». Ainsi, la participation de ces acteurs semble être limitée à des programmes de formation aux risques sanitaires, aux bonnes pratiques et au respect de la réglementation, plutôt qu'à une réelle implication dans la prise de décision des mesures de gestion à mettre en place. L'OMS reconnaît toutefois que, bien que la protection sanitaire soit fondamentale, d'autres questions existent et qu'il est difficile d'y répondre sans l'expérience du terrain. L'implication des acteurs opérationnels, en particulier dans les travaux de recherche, est indiquée comme essentielle. La participation de la recherche est également « *d'une importance capitale pour la mise en au point des mesures de protection sanitaire* ».

En effet, des études menées sur le terrain ont montré que l'implication des agriculteurs dans le choix des mesures était nécessaire à leur application. Leur implication contribue notamment à intégrer les pratiques existantes mais aussi leurs besoins et leurs contraintes dans la formulation des recommandations et ainsi assurer leur application (Keraita *et al.,* 2008 ; Drechsel *et al.,* 2011). Les mesures *barrières* proposées par les directives de l'OMS ne correspondent pas nécessairement aux pratiques existantes. Par exemple, l'étude de Keraita *et al.* (2008) menée au Ghana, a montré que de nombreux mesures *barrières* proposées par les directives de l'OMS de 2006 étaient assez nouvelles dans ce pays. Elles nécessitent des changements de comportements pouvant limiter leur mise en œuvre. Il est alors important que les agriculteurs puissent exprimer leur perception sur les mesures et identifier les mesures leur paraissant « acceptables » à mettre en place et répondant à leurs contraintes (Keraita *et al.*, 2008 ; Bahri *et al.,* 2009 in Drechsel *et al.,* 2011). Dans leur étude, Keraita *et al.* (2008) encouragent la mobilisation des approches participatives pour contribuer à l'application des mesures de gestion à travers l'implication des agriculteurs mais aussi pour permettre leur collaboration avec les autres acteurs et en particulier les scientifiques (Keraita *et al.,* 2008).

L'OMS recommande également la participation des parties prenantes, « dans la mesure du possible », pour le développement et la réalisation des approches de santé publique telles que les PGSSA. Ainsi, l'OMS reconnait que :

> *« Étendre la réutilisation formelle des eaux usées est bien souvent rendu difficile du fait d'une* ***faible coordination, de la complexité de l'interopérabilité des politiques*** *et réglementations portant sur la réutilisation, et* ***des difficultés à identifier et gérer***

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

les risques réels et perçus *pour la santé liés à la réutilisation des eaux usées, des excréta et des eaux ménagères » (WHO, 2016b)*

La constitution d'équipe d'« *experts* » pluridisciplinaire et interdisciplinaire est vivement encouragée par l'OMS pour la planification et la construction des plans de gestion des risques. En effet, il est indiqué que « *Pour que la PGSSA soit un succès, le chef d'équipe aura besoin du soutien d'intervenants de chacune des composantes du système, et ces personnes devront disposer des compétences nécessaires pour évaluer les dangers, comprendre comment gérer les risques et assurer la mise en œuvre des améliorations dans leur domaine respectif »*. Les personnes ayant des compétences en matière de santé mais aussi des compétences techniques sont à inclure, ainsi que les représentants des principaux groupes exposés aux dangers. L'objectif recherché étant un équilibre en termes de compétences techniques, de points de vues et de représentations des différents groupes. L'OMS propose ainsi les PGSSA comme une structure de coordination entre tous les acteurs de la chaîne des services d'assainissement (dans lesquels est intégré l'utilisation des effluents) (WHO, 2015).

Des retours d'expérience ont indiqué différents intérêts liés à la mise en œuvre des PGSSA : expertise collective avec des acteurs aux compétences variées, engagements des parties prenantes, compréhension mutuelle et compréhension des impacts sanitaires (Winkler *et al.*, 2017). Leur mise en pratique est néanmoins encore limitée compte tenu de la nécessité d'un vaste ensemble de connaissances expertes et scientifiques (Faour-Klingbeil *et al.,* 2023). Si l'ensemble des éléments à identifier est largement décrit dans les PGSSA, les outils à mobiliser pour encourager le dialogue et le partage d'informations entre les parties prenantes ne sont néanmoins pas indiqués. Drechsel *et al.* (2022) signalent que les PGSSA n'adressent pas des questions essentielles comme l'accompagnement du changement de comportements. Pour ces auteurs, ces questions sont fondamentales, en particulier pour les agriculteurs dans le cas d'une approche *multi-barrières*. Ils envisagent les approches participatives comme l'un des leviers possibles et indiquent le besoin de méthodes plus opérationnelles que des manuels constitués d'une centaine de pages.

- **Directives australiennes (NRMMC *et al.,* 2006)**

Un chapitre, intitulé « *Consultation and communication »,* est également consacré dans les directives australiennes de 2006 à la consultation et l'implication des parties prenantes. Les projets de réutilisation des eaux usées mobilisent un panel d'acteurs qui en bénéficient mais aussi qui supportent une grande partie des coûts et des risques. L'accent est mis sur une consultation efficace et une communication avec les parties prenantes afin de garantir l'acceptation des projets : « *It is no longer acceptable for "experts" to make decisions on behalf of uninformed or dissenting communities. Nor is it possible for authorities to build community support of dictating what stakeholders "should" think and know* ». Différents outils de communication sont proposés pour apporter des informations sur le fonctionnement du système, les usages, les risques associés… La participation à la planification est également encouragée à travers des outils comme les questionnaires ou les groupes de discussion. La participation est également indiquée comme une composante clé pour améliorer la formation et la sensibilisation des opérateurs et des utilisateurs finaux. Elle favorise l'engagement de ces acteurs dans le contrôle et la mise en place du système. Le degré de participation indiqué pour les opérateurs (par exemple, les opérateurs de la filière de traitement) et les utilisateurs finaux (par exemple, les agriculteurs) ne semble néanmoins pas le même. Il est indiqué que les opérateurs doivent être encouragés à participer aux décisions affectant leurs domaines de responsabilité, comme par exemple la filière de traitement mise en place. Ils doivent également être encouragés à discuter des problèmes et des actions avec la direction. Concernant les utilisateurs finaux, il est indiqué qu'ils doivent être, au minimum, informés des restrictions d'utilisation, sensibilisés à l'importance du respect de ces restrictions, informés des exigences de gestion et de toute pratique qui menacerait la santé humaine

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

ou environnementale. La mise en place d'audits est avancée comme « *une participation active* » des utilisateurs d'EUT en particulier pour l'application des mesures et l'évaluation des impacts.

- **RE 2020/741**

La participation des différentes parties prenantes est mentionnée à l'article 5 « Gestion des risques ». Il est indiqué que le plan de gestion des risques doit être préparé « *par l'exploitant d'installation de récupération, les autres parties responsables et les utilisateurs finaux, en tant que de besoin* ». La consultation des autres parties prenantes est également encouragée : « *Les parties responsables qui préparent le plan de gestion des risques liés à la réutilisation de l'eau consultent toutes les autres parties responsables concernées et les utilisateurs finaux, en tant que de besoin* ». Quelques informations supplémentaires sont apportées dans le guide technique du JRC. Comme pour la PGSSA, la création d'une équipe dédiée à l'établissement du plan de gestion des risques est encouragée. L'objectif est que la composition assure un équilibre entre l'expertise technique et les compétences en matière de santé et d'environnement pour identifier les risques mais aussi la compréhension des mesures de gestion et des calculs d'incertitudes. L'intégration des parties prenantes dans l'évaluation, le contrôle et la gestion est également indiquée comme un facteur clé en particulier pour travailler la perception des dangers et des risques. En effet, les experts du JRC indiquent que cette perception influence notamment : la compréhension et l'acceptation des projets, la confiance envers le système mais aussi la gestion globale des risques (Maffettone & Gawlik, 2022). Ces éléments se basent en particulier sur l'étude de Goodwin *et al.* (2019a). Les auteurs ont montré que la perception des risques sanitaires est un facteur d'influence important dans l'établissement des choix de gestion, au-delà des aspects techniques et économiques. Ils encouragent la collaboration des parties prenantes pour la construction de la gestion des risques. Néanmoins, pour la REUT, de nombreuses études portent sur l'acceptabilité des parties prenantes sans réellement approfondir l'influence d'une participation plus active dans le processus de conception des systèmes ou de définition des préférences en terme de gestion des risques (Woltersdorf *et al.,* 2017 cité par Goodwin *et al.,* 2019a). Goodwin *et al.* (2019a) encouragent la collaboration des parties prenantes pour définir les choix de gestion.

Les experts du JRC admettent qu'il est important d'intégrer l'ensemble des parties prenantes. Néanmoins, l'un des principaux défis est d'identifier tous les acteurs concernés et les sensibiliser à leur rôle et leur responsabilité dans le processus, aussi bien les distributeurs que les utilisateurs finaux (Maffettone & Gawlik, 2022). Aucun outil ou méthodologie n'est indiqué pour accompagner l'identification des acteurs concernés et permettre leur collaboration. Au final, les approches participatives sont assez peu abordées dans ce guide technique. Les experts du JRC reconnaissent que cela dépasse la portée du rapport, bien qu'il soit essentiel de comprendre les besoins et les attentes des différentes parties prenantes. Pour Goodwin *et al.* (2019), les cadres politiques et réglementaires actuels doivent se fournir de méthodes plus opérationnelles pour intégrer les parties prenantes dans l'évaluation et la gestion des risques et assurer leur engagement. Ces méthodes doivent être plus participatives et aidant les parties prenantes à exprimer leurs raisonnements et leurs préférences concernant la gestion des risques (Goodwin *et al.,*2019a). Ces outils semblent d'autant plus important que l'introduction de l'approche *Multi-barrières* nécessite une réflexion sur le partage des responsabilités. Pour Dingemans *et al.* (2020), les exigences du RE 2020/741 en terme d'engagement des parties prenantes sont finalement assez limitées.

- **AF du 18/12/2023**

En France, les démarches participatives sont encouragées dans quelques guides ou rapports consacrés à la REUT. Les objectifs associés à ces démarches sont informer et encourager la participation de tous les acteurs, et en particulier des citoyens (ARPE, 2017 ; INEC, 2018). La systématisation de ces

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

démarches, et notamment des « consultations publiques en amont », est encouragée. L'objectif est de favoriser le partage des usages, informer les citoyens et intégrer les propositions et les revendications des acteurs (Locqueville *et al.,* 2023). Les citoyens sont donc généralement ciblés par ces démarches. Quelques travaux de recherches se sont également intéressés à la participation et à la communication pour la REUT en France et à la mobilisation des approches participatives (Noury *et al.,* 2019 ; Noury, 2021). Ces approches restent toutefois assez peu mobilisées. Dans sa thèse de doctorat soutenue en 2021, B. Noury indique que la REUT est encore « *un objet non-controversé* » et reste confinée à un cercle d'acteurs restreints. En effet, les projets sont alors encore peu nombreux. Avec les annonces du Plan Eau et l'engouement médiatique pour la pratique qui ont eu lieu depuis 2021, ce constat pourrait être amené à évoluer. Néanmoins, les enjeux associés à l'intégration de l'ensemble des parties prenantes semblent absents des cadres réglementaires.

Pour obtenir l'autorisation d'utiliser les EUT, l'AF du 28 juillet 2022 relatif au dossier de demande d'autorisation indique que différents éléments doivent être rassemblés dont la description du système, une évaluation des risques sanitaires et l'identification des mesures préventives et correctives. L'AF indique que les publics concernés sont notamment « *les maîtres d'ouvrage et exploitants d'un système d'assainissement collectif permettant la collecte, le transport et le traitement des eaux usées, des installations d'assainissement non collectif et d'un système de distribution, de stockage ou d'utilisation des eaux usées traitées et les exploitants des installations classées pour la protection de l'environnement* ». Un large ensemble d'acteurs opérationnels doit donc être impliqué pour la production du dossier. Dans le cas de la mise en place de barrières spécifiques au-delà de celles relevant de la responsabilité directe du producteur, du stockeur, du distributeur ou de l'utilisateur des eaux usées, les opérateurs professionnels de la chaîne alimentaire seront également impliqués comme « *parties prenantes aux barrières* » (AF du 18/12/2023). Ainsi, d'autres acteurs peuvent être également impliqués dans la gestion des risques. Nous avons montré dans le chapitre 1 que, selon les équipements utilisés, les riverains et les passants pouvaient être exposés aux risques. Au-delà de leur participation en tant que populations exposées, elles pourraient également être impliquées dans la gestion si des mesures barrières sont mises en place à leur échelle. C'est le cas, par exemple, des panneaux de signalisation, dont la contribution repose sur la responsabilité individuelle. Des acteurs non professionnels seraient donc éventuellement à intégrer dans la gestion des risques. Le dossier est ensuite adressé au préfet de département. Les acteurs institutionnels sont donc également concernés et notamment les services instructeurs (le préfet et la Direction départementale des territoires (DDT/DDTM) qui délivrent l'autorisation et qui sont en charge de l'application de l'arrêté. Depuis la parution du *Décret n°2023-835 du 29 août 2023 relatif à l'usage et aux conditions des eaux de pluie et des eaux usées traitées*, les avis conformes de l'Agence régionale de santé (ARS) et du Conseil départemental de l'environnement et des risques sanitaires et technologiques (CODERST) ne sont plus obligatoires. Néanmoins, ces acteurs semblent importants pour apporter les informations concernant le volet sanitaire. Enfin, lors de la construction du modèle d'évaluation et de gestion (Chapitre 1), nous avons montré qu'un ensemble important de connaissances scientifiques pouvait être nécessaire pour réaliser l'évaluation des risques. L'implication de la recherche parait donc également importante.

En conclusion, un large panel d'acteurs va être mobilisé pour construire ce dossier et plus largement dans l'application et le contrôle de la gestion des risques. De manière générale, la REUT implique un ensemble d'acteurs qui n'ont néanmoins pas nécessairement l'habitude de travailler ensemble (ARPE, 2017). Aucune analyse ou retour d'expérience n'a été identifié concernant l'organisation actuelle des montages de ces dossiers de demandes d'autorisation ni la formulation des choix de gestion et les conséquences, intérêts et limites de cette organisation. Il aurait été intéressant de réaliser cette analyse. Nous verrons, dans le chapitre 3, que les entretiens menés avec les différents acteurs du terrain ont apporté quelques éléments et l'identification de besoins. Telle qu'elle est indiquée dans l'AF du 28/07/2022, la construction du dossier risque d'être un processus assez vertical, en particulier

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

entre les acteurs opérationnels et les acteurs institutionnels. Il serait d'abord rédigé par les acteurs opérationnels, puis transmis aux services instructeurs avant d'être envoyé aux autorités sanitaires pour ensuite suivre le processus inverse. Cela pourrait présenter certaines limites, en particulier concernant l'évaluation des risques et les choix de gestion. En effet, plusieurs études ont montré que la perception des risques est différente entre les parties prenantes et amènent à des choix de gestion différents (Hartley, 2006 ; Keraita *et al.,* 2008 ; Goodwin *et al.,* 2019a). Ce sera le sujet de notre prochaine section. Avant de conclure cette analyse des cadres normatifs, il est intéressant de mentionner l'approche participative mobilisée pour la construction de l'AF du 18/12/2023 pour l'irrigation agricole ainsi que celui du 14/12/2023 pour l'arrosage des espaces verts. Pour rappel, ces deux projets d'arrêté ministériel avaient pour objet la modification des dispositions de l'arrêté du 2 août 2010 et l'intégration des normes de qualité issues du RE 2020/741. Les projets ont été soumis, après élaboration, à la consultation publique nationale entre le 07/06/2023 et le 28/06/2023. Si l'initiative est intéressante et fait écho aux prescriptions de l'OMS pour une participation des parties prenantes dans les aspects politiques, elle présente néanmoins quelques limites dans sa forme mais aussi dans sa durée. En effet, cette consultation s'est déroulée sur un total de 21 jours, une durée qui semble assez limitée pour recueillir les points de vue de l'ensemble des acteurs de la REUT.

En conclusion, les cadres normatifs invitent à la mobilisation des approches participatives, en particulier la communication et la consultation auprès des communautés locales pour assurer l'acceptation des projets. L'intégration de l'ensemble des parties prenantes dans la planification et la mise en œuvre est également encouragée. En effet, les études sur le terrain ont confirmé l'importance de construire collectivement la gestion afin d'intégrer les connaissances propres à chaque groupe de parties prenantes mais aussi les spécificités locales, les attentes et les besoins. Ces approches contribuent également à un partage des représentations en particulier concernant les risques. Différents outils participatifs sont mentionnés dans les cadres normatifs. Néanmoins, le besoin d'une méthodologie plus opérationnelle a été identifié. Dans leur guide intitulé *Participative planning for water reuse projects,* Jeffrey & Russell (2007) proposent un ensemble d'outils participatifs mobilisables pour un projet de réutilisation des eaux usées. Au-delà des outils indiqués par les cadres normatifs (réunions d'information, publications, groupes de travail, enquêtes…), d'autres outils sont proposés dont les outils de simulation. Selon Jeffrey & Russell, ces outils permettent l'implication des parties prenantes dans le processus de décision, permettent l'exploration de nouvelles possibilités mais aussi aux participants de construire leurs opinions. Nous allons voir que les outils de simulation présentent un intérêt particulier par rapport aux autres outils proposés. En effet, selon la méthode utilisée, les niveaux de participation des parties prenantes ne seront pas les mêmes. Au final, nous allons voir que la participation recouvre différentes définitions.

2.1.1.2 Un concept recouvrant différentes définitions

La Banque Mondiale propose de définir la participation comme un processus par lequel les parties prenantes influencent et partagent le contrôle des initiatives de développement, et des décisions et des ressources qui les concernent (Bhatnagar et al., 1996 cité par Lombard-Latune, 2019). Bien que le concept de la participation ne soit pas nouveau, il s'impose comme un concept incontournable dans de nombreux domaines, notamment à la fin du XX^{ème} siècle. En effet, les approches « descendantes » (ou « *top-down* »), généralement caractérisées par des décisions provenant des niveaux hiérarchiques supérieurs et appliquées/imposées aux niveaux inférieurs, sont remises en question. Elles ont montré leurs limites pour la formulation de solutions adaptées aux besoins locaux, en particulier dans des environnements complexes et marqués par les incertitudes tels que les ressources naturelles. La reconnaissance des capacités des acteurs pour assurer leur propre développement renforce également cette remise en question (Barnaud, 2008). Des travaux fondateurs comme ceux d'Elinor Ostrom (1990) sur la *Gouvernance des biens communs* ont ainsi démontré les intérêts d'une

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

intégration active des acteurs locaux pour une gestion durable des ressources. Il s'agit désormais d'inciter les approches « ascendantes » (ou « *bottom-up* »), basées sur la demande et qui intègrent de multiples dimensions, en opposition aux approches traditionnelles, uni-sectorielles et verticales (Basco-Carrera *et al.,* 2017). La participation des différentes parties prenantes est une composante intrinsèque de ces approches ascendantes. Une généralisation de ce concept s'observe alors à l'échelle mondiale notamment pour la gestion des ressources naturelles. Ainsi, le principe 10 de la *Déclaration de Rio sur l'environnement et le développement* énoncée lors du Sommet de la Terre en 1992 stipule que :

> *« La meilleure façon de traiter les questions d'environnement est d'assurer **la participation de tous les citoyens concernés**, au niveau qui convient. Au niveau national, chaque individu doit avoir dûment accès aux informations relatives à l'environnement que détiennent les autorités publiques, y compris aux informations relatives aux substances et activités dangereuses dans leurs collectivités, et **avoir la possibilité de participer aux processus de prise de décision**. Les Etats doivent faciliter et encourager **la sensibilisation et la participation** du public en mettant les informations à la disposition de celui-ci » (ONU, 1992).*

Les grands organismes multilatéraux s'en sont emparés et lui ont conféré une ampleur telle que la participation, et donc les approches participatives, est désormais incontournable (Barnaud, 2008). La généralisation de ce concept a opéré de profonds changements en particulier dans la gestion des ressources en eau. Ainsi, la « *gestion intégrée des ressources en eau* » (GIRE) encourage une approche intersectorielle et systémique pour prendre en compte les enjeux quantitatifs et qualitatifs liés aux ressources en eau, à différentes échelles de temps et sous l'angle d'une gestion durable et concertée (Petit, 2009). De nouvelles formes de gouvernance sont encouragées, appelant à la participation des parties prenantes pour la planification et la prise de décision. Les approches participatives répondent à différents besoins : prise en considération de la diversité de points de vue et des besoins locaux, construction de projets adaptés et partagés ou encore association des acteurs dans le processus décisionnel (Hassenforder *et al.,* 2020a). Néanmoins, la participation semble recouvrir plusieurs définitions et composantes aussi bien dans les personnes mobilisées que dans les méthodologies utilisées et dans le niveau d'engagement dans le processus de décision qui est proposé.

Arnstein (1969) définit ainsi une échelle de la participation où trois niveaux sont établis afin de pouvoir distinguer i) ce qui relève ou non de la participation et ii) ce qui relève du symbolique ou du pouvoir citoyen dans la participation (Figure 16).

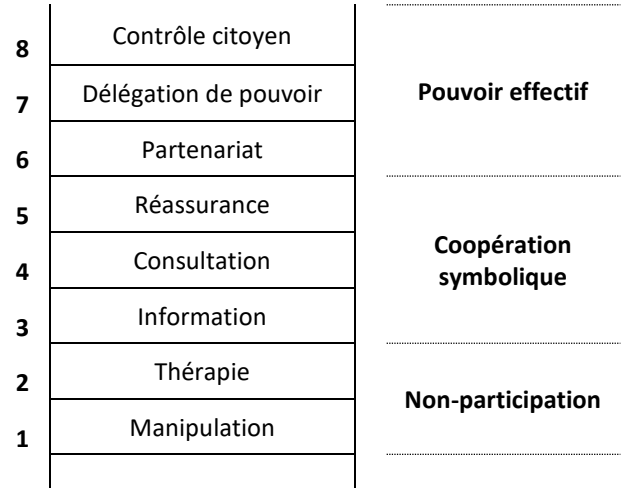


Figure 16 : Les huit échelons de la participation citoyenne (adapté de Arnstein, 1969)

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

Chaque échelon de l'échelle proposée par Arnstein correspond à des objectifs de participation, ou de non-participation, qui lui sont propres. Par exemple, l'information (n°3) et la consultation (n°4) permettent aux citoyens d'entendre et d'être entendus. Néanmoins, le pouvoir limité qui leur est conféré à ces deux échelons ne leur permet pas de s'assurer que leurs points de vue seront effectivement pris en compte par ceux qui détiennent le pouvoir. A l'inverse, les échelons n°6 à n°8 ont un degré participatif bien plus élevé : les acteurs deviennent responsables des décisions, peuvent occuper une position leur conférant une autorité et une responsabilité, voire même un contrôle total (Arnstein, 1969). Ainsi, il s'observe parfois un décalage entre le processus participatif et la prise de décision, notamment institutionnelle (Hassenforder *et al.,* 2020a). Différentes limites ont été observées dans les approches participatives concernant le processus participatif en lui-même (objectifs fixés, moyens mobilisés…) et ses effets sur le terrain (réelle mise en œuvre des productions…) (Barnaud, 2008). La qualité du processus participatif est donc primordiale puisque les finalités attendues de la participation, et notamment les éventuels effets positifs, en dépendront (Noury, 2021).

Nous ne retracerons pas ici l'histoire du concept de la participation, ni sa mobilisation pour la gestion des ressources naturelles ou des ressources en eau. La littérature est abondante sur le sujet et d'autres auteurs s'y sont attelés (Barnaud, 2008 ; Hassenforder *et al.,* 2020a). En revanche, il semblait intéressant d'étudier les informations recueillies précédemment concernant les approches participatives pour la REUT agricole à travers l'échelle proposée par Arnstein (1969). Cette échelle concerne les citoyens mais elle peut être élargie à d'autres acteurs comme les agriculteurs. Au final, l'information (échelon n°3) et la consultation (échelon n°4) sont encouragés en particulier pour les citoyens et les agriculteurs. La collaboration entre les différents acteurs (notamment institutionnels, opérationnels et scientifiques) est également indiquée (échelon n°5). Néanmoins, aucune méthodologie n'est réellement proposée pour accompagner leur mise en œuvre. Des échelons n°7 et n°8, qui permettent un pouvoir effectif des acteurs à travers une autorité réelle sur le plan de la décision et une implication réelle dans les tâches de conception, de planification et de direction, semblent peu mis en œuvre.

L'analyse réalisée dans la section précédente nous a également permis de mettre en lumière que la mise en œuvre des approches participatives étaient particulièrement liée avec la perception des risques. Après avoir identifié différentes approches participatives et fait un bref état des lieux sur leur mobilisation pour la REUT, nous allons maintenant nous intéresser à un facteur d'influence important qui est la perception des risques.

2.1.2 Construire la gestion des risques dans un contexte de complexité généralisée

2.1.2.1 Un système multi-acteurs aux comportements incertains vis-à-vis des risques associés à la REUT

De manière générale, nos sociétés semblent faire face à un paradoxe : bien que de nombreux moyens soient développés pour assurer une plus grande sécurité dans nos vies (technologies poussées, méthodes d'analyses précises…), le risque reste néanmoins une préoccupation centrale. Ce paradoxe peut être transposé à la REUT : bien que des technologies de traitement poussées soient développées, que des méthodes d'évaluation précises comme la QMRA aient été élaborées, que des études sur le sujet aient été menées et que des réglementations strictes aient été produites, les risques associés à la REUT et leur gestion restent un sujet central. La question soulevée par Chauvin (2014) semble ainsi intéressante « *Quelle peut être l'origine de telles préoccupations, pouvant paraître en décalage au vu des efforts fournis et irrationnelles aux yeux des « experts » du risque ?* ». Ainsi, nous allons d'abord nous intéresser à la place du risque dans nos sociétés de manière générale et au champ d'étude de la

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

perception des risques qui s'est développé dans les années 1980. Nous verrons ensuite l'importance de ne pas négliger cette perception dans la construction des choix de gestion.

Le risque est « *un concept subtil aux multiples significations* » (Slovic, 1999 cité par Chavin, 2014). Si le risque peut être associé à l'idée de choix et de liberté (illustrée par l'expression « *prendre des risques* »), il est plus classiquement corrélé à l'idée d'aléa ou de menace. Une connotation négative plutôt dominante de nos jours (Cartuyvels, 2008). Il est difficile de parler de risques sans mentionner la théorie, bien que controversée, d'Ulrich Beck et sa « société du risque » (1986). Selon Beck, les dangers ou menaces ont longtemps été expliqués par le destin ou la nature. Puis, avec la naissance des sociétés industrielles et des avancées techniques est apparue l'idée qu'il était possible de les maîtriser : la découverte des herbicides a contribué à diminuer les risques de pénurie alimentaire, la chimie a produit des médicaments permettant de guérir ou encore les centrales nucléaires ont produit de l'électricité en grande quantité. Néanmoins, les catastrophes notamment industrielles telles que l'explosion de l'usine de pesticides à Bhopal (Inde, 1984), la rupture du barrage de Tesero (Italie, 1985) ou encore Tchernobyl (1986) ont entrainé ce que Beck appelle « *une rupture à l'intérieur de la modernité* » où « *la religion du progrès* », jusque-là génératrice de richesses, devient génératrice de menaces. Une méfiance s'instaure alors en particulier vers la rationalité scientifique productrice de ces avancées. Pour Beck, la science a perdu sa crédibilité et son autorité pour s'exprimer sur les risques et donc son monopole sur le sujet. L'expérience et l'incertitude du risque se généralise comme le résume Demortain (2019). Cet auteur raccroche la « société du risque » avec la « *société de la controverse dans laquelle les incertitudes paraissent largement irréductibles et où les énoncés scientifiques sont publiquement mis à l'épreuve* ». Une controverse à laquelle les savoirs de gouvernement doivent répondre. Cet auteur propose de mettre en regard cette « *société du risque* » avec la « *société de l'analyse* », qui se développe en parallèle à cette époque. Demortain soulève ainsi une certaine contradiction dans la théorie de Beck en particulier concernant la destitution de l'autorité de la science. En effet, une véritable discipline du risque apparaît à l'époque avec le développement des méthodes d'analyse des risques et leur institutionnalisation pour l'aide à la décision des autorités publiques. C'est le cas par exemple du Red Book puis des différents schémas évaluation/gestion tels que les WSP, le *Codex Alimentarius* ou les directives de l'OMS comme nous l'avons mentionné dans le chapitre 1. Ainsi, les controverses et le scepticisme vis à vis des vérités scientifiques semblent grandir malgré un renforcement des méthodes d'évaluation et de gestion des risques pour encadrer au maximum les pratiques et limiter leurs conséquences.

De nouveaux champs d'étude apparaissent également à cette époque comme la « *perception des risques* » pour interroger la part des choix individuels dans des contextes d'incertitudes collectives (Demortain, 2019). Comme indiqué précédemment, au-delà de la conception « *experte* » qui définit le risque à partir des probabilités d'occurrence et de leurs conséquences, il existe donc une conception « *psychosociale et cognitive* » qui définit le risque comme un « *construct subjectif issu d'un mélange de divers facteurs (tant quantitatifs que qualitatifs* » (Chauvin, 2014). Ainsi, à partir des années 50, la compréhension et la modélisation des comportements et des attitudes des individus en situation de risque ou d'incertitude est au cœur de nombreux travaux en sciences sociales. Dans les années 70, émergent les recherches sur l'« *acceptabilité sociale* » des risques (Raude, 2007 ; Noury 2021). En effet, une déconnection est observée entre la perception, en particulier du public, et l'évaluation technique des risques (Wilson *et al.,* 2019). Il ne s'agit donc plus seulement d'évaluer et de gérer les risques mais également de gérer leur représentation ainsi que les comportements associés (Noury, 2021). Les termes « *représentation* » ou « *construction sociale* » sont parfois préférés au terme « *perception* », la Royal Society propose néanmoins de maintenir cette notion en l'entendant comme « *l'ensemble des croyances, des attitudes, des jugements et des sentiments, mais aussi des valeurs socioculturelles et des dispositions que les individus adoptent à l'égard des dangers et de leurs bénéfices éventuels »* (Raude, 2007). Le terme « *perception* » sera donc retenu pour la suite car me semblant recouvrir un

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

certain nombre des facteurs identifiés dans la littérature qui composent la perception des risques liés à la REUT. Ainsi, la perception des risques est construite à partir d'un ensemble complexe de facteurs, individuels et collectifs, qui dépassent l'apport d'information factuelles (Figure 17).

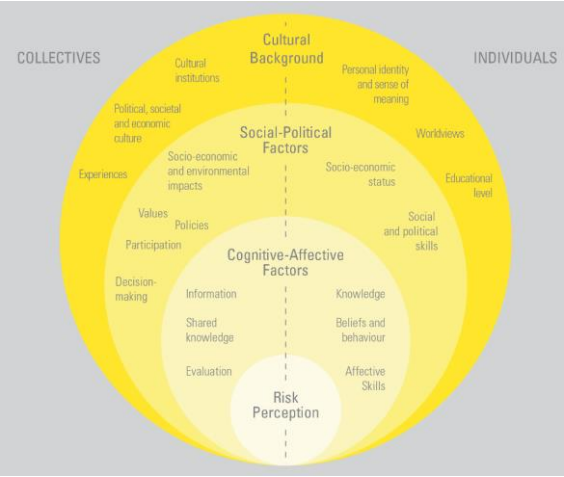


Figure 17 : Ensemble de facteurs influençant la perception des risques (ENHANCE, 2016)

Nous allons maintenant nous intéresser à l'impact de la perception des risques des différentes parties prenantes dans un contexte de REUT et plus précisément ses impacts pour la gestion des risques. La perception des risques sanitaires est un élément déterminant dans les attitudes et les comportements du grand public vis-à-vis de la REUT et donc dans l'acceptation des projets et leur mise en œuvre (Nacarrow *et al.,* 2008 cité par Lautze *et al.,* 2014). Au-delà de la REUT, de nombreuses théories ont émergé autour de la perception des risques par le public. D'abord considérée comme irrationnelle et associée au manque d'information, les politiques de gestion des risques ont adopté la stratégie des campagnes d'information ou d'éducation pour éclairer les savoirs profanes dont le « *voile d'ignorance* » déforme la perception (Raude, 2007). Comme nous avons vu précédemment, l'apport d'information au public est largement encouragé. Ces informations ont pour objectif de renforcer la confiance dans la réglementation et le contrôle, le processus technique mis en place, l'organisation du système mais aussi la qualité et la sécurité du projet en lui-même (Maffettone & Gawlik, 2022). Ainsi, elles portent généralement sur l'intérêt de la REUT et l'efficacité de la gestion mise en place grâce aux procédés de traitement. Néanmoins, les exemples souvent cités des projets de REUT de Toowoomba en Australie et San Diego aux Etats-Unis prouvent que ces éléments ne suffisent pas toujours. Ainsi, un contexte de pénurie d'eau, la mise en place de technologies de traitement poussées ou d'un ensemble de mesures de protection ou encore une communication importante peuvent quand même mener à l'opposition du public et à l'abandon des projets (WHO, 2006 ; Noury, 2021). En effet, d'autres facteurs sont également importants. Des études ont montré que plus le niveau de confiance dans l'autorité délivrant l'EUT est grande, plus elle est associée avec une faible perception des risques et une plus grande acceptation du projet (Ross *et al.,* 2014). L'apport d'informations précises et factuelles comme par exemple les résultats des suivis microbiologiques est un élément important pour renforcer la confiance. Cette préférence des citoyens pour des informations factuelles est également soulignée par Garin *et al.* (2021). La communication autour des risques et de la REUT en général est un exercice difficile et peut ainsi être contreproductif. Noury (2021) indique que, jusqu'à présent, les projets agricoles précurseurs comme Noirmoutier ou l'Ile de Ré ne communiquaient pas sur la REUT et que les agriculteurs s'exprimaient principalement dans des revues spécialisées. Le récent engouement pour la pratique semble avoir dans une certaine mesure libéré la parole (Figure 18).

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés



« Le point sensible, c'est le contrôle sanitaire. *« Un arrêté préfectoral nous impose* ***un suivi régulier*** *sur certains paramètres »* explique Cyril Groslier, technicien assainissement à la communauté de communes. « *Dès lors qu'on a un dépassement de seuils, on se doit de stopper l'irrigation, d'avertir les irrigants et le préfet. Donc on* ***fait des analyses toutes les semaines*** *en période d'irrigation sur, notamment, Escherichia coli et les matières en suspension.* ***L'élément le plus compliqué à gérer, c'est la bactériologie*** *»* (Monin, 2023)

Extrait 1 : France Info, 25/01/2023



« Pour arroser des cultures, les eaux usées traitées doivent atteindre un ***niveau bactériologique très bas,*** *ce que le lagunage permet »,* précise Christophe Cautier, président de l'association syndicale autorisée (Asa) Limagne noire *(…)* À Clermont-Ferrand, les analyses hebdomadaires montrent en effet un niveau bactériologique très bas, niveau « qualité de baignade ». *« Pour nous, la réglementation européenne ne changera pas grand-chose, mais elle risque de freiner le développement de la réutilisation des eaux usées pour l'agriculture alors que les besoins en irrigation sont de plus en plus criants »,* alerte Christophe Cautier » (Houot, 2021)

Extrait 2 : La Croix, 02/11/2021

Figure 18 : Extraits de différents médias français s'intéressant à la REUT

Ces extraits montrent que la gestion des risques sanitaires est un élément présent dans la communication sur les risques sanitaires. La maîtrise des éléments associés à la gestion des risques par les gestionnaires pourrait donc être un facteur clé pour contribuer à renforcer la confiance du public. Goodwin *et al.,* (2019b) indique que la confiance vis-à-vis de l'ensemble des gestionnaires, y compris les agriculteurs, vis-à-vis des autorités sanitaires ou encore des scientifiques est essentielle. La perception d'une gestion organisée et de responsabilités qui sont établies est également importante. Concernant l'implication du public, l'OMS indique que la perception des risques sanitaires peut amener à différents comportements chez le consommateur dont la mise en place de mesures *barrières* à son échelle (cuisson, lavage, pelage…) (WHO, 2006). Néanmoins, elle peut également entrainer un refus des produits irrigués avec des eaux usées. Cela fait écho aux questionnements associées à l'intégration des consommateurs dans la gestion des risques (Chapitre 1).

La perception de la pratique par le grand public est un facteur d'influence pour les décideurs et peut amener à des exigences de gestion des risques très poussées, en particulier concernant la qualité des EUT (Molle *et al.,* 2012). Les connaissances actuelles sur le sujet influencent également la prise de décision. En effet, un ensemble de connaissances scientifiques sur les risques sanitaires liés à la REUT existe. Des moyens techniques pour leur gestion ont également été développés comme les procédés de traitement avancés (Toze, 2005). Néanmoins, certaines incertitudes liées au manque de données, en particulier sur les risques chimiques, de méthodes validées pour évaluer les risques et des éventuels risques de dysfonctionnements des procédés de traitement contribuent à la perception de risques « *potentiels* » liés à la REUT par les acteurs institutionnels. Cela amène généralement l'application du principe de précaution par les décideurs et la mise en place de cadres réglementaires souvent restrictifs, négligeant les retours d'expérience d'une pratique qui n'est pourtant pas nouvelle (Molle *et al.,* 2012). Les eaux sont alors « sur-traitées » pour atteindre ces critères, malgré les conséquences économiques associées. Néanmoins, ce sur-traitement n'est pas toujours garantie d'une absence de risques puisque des risques peuvent persister même après le traitement (Toze, 2005). Il n'est également pas toujours garantie d'une acceptation de la pratique par l'opinion publique comme nous l'avons montré précédemment. La perception des risques « *potentiels* » et leur considération par les

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

décideurs est néanmoins variable selon les contextes. Ainsi, un niveau de tensions élevé sur les ressources limite l'application de ce principe de précaution (Molle *et al.,* 2012). Cela confère donc une part de subjectivité aux comportements des acteurs institutionnels. Leur perception de l'approche *Multi-barrières* et les comportements associés est donc incertain. Il est d'autant plus incertain que leur prise de décision un contexte d'incertitudes des données mais également des comportements des autres acteurs comme les acteurs opérationnels.

La perception des risques sanitaires liés à la réutilisation des eaux usées par les utilisateurs des eaux usées a fait l'objet d'un certain nombre d'études dans les pays du sud en particulier en regard de l'approche *multi-barrières* (Keraita *et al.,* 2008 ; Amoah *et al.,* 2011 ; Drechsel *et al.,* 2011). Quelques études ont été identifiées pour les pays du Nord (Michetti *et al.,* 2019) ainsi que des revues de littérature à plus large échelle (Ricart *et al.,* 2019 ; Mirra *et al.,* 2024). La perception des risques des agriculteurs est généralement également associée à l'adoption de la pratique mais aussi à l'application des mesures de réduction des risques. Plusieurs attitudes vis-à-vis des risques sont identifiés chez les agriculteurs. Par exemple, chez certains agriculteurs, les risques ne sont pas toujours perçus en raison d'une faible sensibilisation vis-à-vis du sujet ou du caractère « invisible » de ces risques (Keraita *et al.*, 2008 ; Keraita, 2010a cité par Karg *et al*., 2011 ; Michetti *et al.,* 2019). Chez d'autres, les risques sanitaires sont perçus mais « acceptés » notamment lorsque le besoin vis-à-vis de cette ressource est important (Qadir *et al.,* 2010 cité par Dickin *et al.,* 2016) ou qu'elle génère des bénéfices économiques. Parfois, les conséquences sanitaires sont considérées comme inhérentes à la profession (Drechsel *et al.,* 2011). Le sentiment d'avoir acquis une immunité après des années d'exposition aux eaux usées ou bien celui que les eaux usées ont conséquences moins graves que d'autres éléments comme les pesticides amènent également à une acceptation des risques (Keraita *et al*., 2008). Enfin, il est également possible que les utilisateurs des eaux usées indiquent une absence de risques associés à la pratique en réaction à la stigmatisation que cette pratique peut entraîner (Keraita *et al.,* 2008).

La perception des risques est également un facteur d'influence sur la mise en place des mesures de gestion par les utilisateurs. Par exemple, lorsque les risques associés à la réutilisation des eaux usées sont perçus comme étant faibles, les mesures *barrières* ne sont pas toujours appliquées (Keraita *et al.,* 2008). Renforcer les connaissances et la sensibilisation des utilisateurs aux risques est un facteur clé pour la mise en place des mesures de gestion. Les autres utilisateurs peuvent également être un facteur de changement, de même que le renforcement de la confiance envers les autres acteurs, et en particulier envers les acteurs institutionnels (Keraita *et al.,* 2008 ; Michetti *et al.,* 2019).

Nous avons présenté dans cette section quelques résultats concernant la perception des risques chez certains acteurs de la REUT (consommateurs, agriculteurs, institutionnels…) et son influence dans les attitudes vis-à-vis de la pratique et les comportements. De grandes généralités sont parfois faites comme une tendance à la sur-estimation des risques par les acteurs institutionnels et la société civile et une sous-estimation par les acteurs opérationnels. Néanmoins, nous avons vu que la perception est généralement hétérogène et qu'elle peut varier au sein d'un même groupe d'acteurs (Baggett *et al.,* 2006 ; Hartley, 2006 ; Goodwin *et al.* 2019b). C'est un facteur d'influence déterminant pour la planification et le fonctionnement des projets : formulation des choix de gestion des risques (Goodwin *et al.* 2019b), application des mesures barrières par les agriculteurs (Keraita *et al.,* 2008 ; Drechsel *et al.,* 2011), acceptation des projets notamment par le public (Baggett *et al.,* 2006 ; Hartley, 2006 ; Noury, 2021 ; Maffettone & Gawlik, 2022) ou encore élaboration des normes (Molle *et al.,* 2012) et leur mise en œuvre (Kallas *et al.,* 2010 cité par Faour-Klingbeil, 2023). Elle est influencée par un ensemble de facteurs cognitifs, socioculturels et affectifs propres à l'individu mais aussi liés aux autres parties prenantes (ENHANCE, 2016). Au final, elle est difficilement prévisible, de même que les comportements des acteurs qui y seront associés.

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

La gestion des risques microbiologiques pour la REUT s'inscrit dans un système complexe « *en raison de la diversité des processus qui s'y déroulent, (et de sa) capacité (à) évoluer dans différentes directions, ce qui rend cette dynamique difficile à prévoir à partir des conditions du présent* » (Lévy & Lussault, 2013 cité par Monfort, 2023). Au final, ce système est loin d'une situation « normale » où les données scientifiques sont suffisantes pour résoudre les problèmes qui sont posés. Les faits sont incertains et les valeurs sont en conflit ce qui l'approche plutôt d'une situation « post-normale » (Funtowicz & Ravetz, 1993 cité par Becu, 2020).

Les approches participatives indiquées par les cadres normatifs semblent limitées tant sur l'implication de l'ensemble des parties dans la construction de la gestion que sur l'appréhension des enjeux associés aux systèmes complexes. Nous allons voir que d'autres approches participatives existent, comme les démarches de modélisation participative. Ces démarches nous intéressent particulièrement pour la construction collective de la gestion des risques pour la REUT agricole. En effet, elles mobilisent la modélisation pour représenter les systèmes complexes et intègrent les parties prenantes dans le processus de création de leur modèle. La modélisation est alors un processus itératif d'apprentissage qui contribue à la compréhension du système et à la gestion des situations complexes tout en facilitant la prise de décision collective (Etienne *et al.,* 2009 ; Becu, 2020). Le modèle peut être implémenté sous différentes formes pour travailler la problématique associée au système réel dont celle d'un outil de simulation participative. Nous allons aborder ces éléments plus en détail dans la prochaine section.

2.1.2.2 La modélisation d'accompagnement pour co-construire un outil de simulation participative

Nous allons maintenant nous intéresser à la modélisation participative et notamment la modélisation d'accompagnement développée par le collectif ComMod. Le domaine de la modélisation participative est vaste. D'autres méthodes et outils existent, comme les outils CoOPLAaGE (Coupler des Outils Ouverts et Participatifs pour Laisser les Acteurs s'Adapter pour la Gestion de l'Eau) développés par une équipe de chercheurs de l'UMR Gestion de l'Eau, Acteurs et Usages (G-Eau) de Montpellier. Pour notre démarche participative, nous avons choisi de nous focaliser sur l'approche ComMod.

- **Origines et fondements théoriques de la modélisation d'accompagnement**

La représentation sous forme de « modèle » (« la modélisation ») s'est largement développée pour appréhender les systèmes et notamment les systèmes complexes. Les modèles correspondent à des représentations simplifiées d'une « réalité » donnée (Le Page *et al.,* 2010 cité par Becu, 2020). Ils contribuent ainsi à faciliter la compréhension des systèmes réels par les acteurs de ces systèmes mais aussi la communication entre ces acteurs. Ils leur permettent alors de répondre à un certain nombre de question sur leur système réel et également la transformation de ce système (Schlüter *et al.,* 2019 ; Ferrand *et al.,* 2024). Compte tenu des incertitudes et de l'impossibilité de prédire certains comportements, mais aussi du changement progressif vers une planification de la gestion plus horizontale, des outils centrés sur une co-construction des représentations des systèmes, et donc des modèles, ont été développés (Etienne *et al.,* 2011). C'est le cas de la « modélisation d'accompagnement » (ou « ComMod » pour « *compagnion modeling* »), une démarche participative visant à accompagner les acteurs d'un système dans des processus d'apprentissage collectif et de coordination notamment à travers la co-construction de leur modèle (Barnaud, 2008).

La démarche ComMod a été développée dans les années 1990 par un groupe de chercheurs du CIRAD travaillant dans le domaine de la gestion des ressources renouvelables. Ces chercheurs souhaitaient aborder ce sujet avec un autre regard en engageant une démarche pluridisciplinaire. Ils proposèrent alors de s'appuyer sur la modélisation pour faciliter le processus d'interaction entre les chercheurs de

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

différentes disciplines (Barnaud, 2008). Les systèmes multi-agents ont rapidement été mobilisés par ces chercheurs pour aborder les systèmes d'interactions. Ainsi « *Le modèle sert alors principalement d'objet médiateur aux discussions entre différents chercheurs ou acteurs engagés dans la co-construction d'un point de vue commun, conformément au cadre de l'interdisciplinarité proposé par Jolivet et Pavet* (1993) » (Le Page, 2017 cité par Becu, 2020). Bien que particulièrement intéressantes, nous ne présenterons pas en détail les origines de la démarche. Comme indiqué par Becu (2020), elles ont été largement documentées soit par les fondateurs de la démarche (Bousquet et al. 1996a, 2002, Barreteau 1998, d'Aquino et al. 2001a, Barreteau et al. 2003b cités par Becu, 2020), soit dans les différentes versions de la « charte ComMod » (Barreteau et al. 2003a, ComMod 2005, Association ComMod 2013 cités par Becu, 2020), soit dans les écrits de synthèse à propos de la démarche (ComMod 2009, Daré et al. 2009, Etienne 2010a, 2015 cités par Becu, 2020). Une description des origines de la démarche est également proposée par Nicolas Becu dans son manuscrit d'Habilitation à diriger les recherches (Becu, 2020) ainsi que le manuscrit de thèse de Cécile Barnaud (2008). Il nous semble néanmoins important de présenter ses fondements théoriques afin de comprendre l'intérêt de la mobilisation de la modélisation d'accompagnement pour nos objectifs de recherche. Ils sont également importants pour réfléchir la construction de notre démarche participative au-delà des principes énoncés dans la chartre ComMod (Association ComMod, 2013), que nous présenterons dans un prochain paragraphe.

Les fondements théoriques auxquels se réfèrent la démarche ne sont pas arrêtés. Comme indiqué par Barnaud (2008), le processus ayant donné naissance à la démarche de modélisation « *fut – et est toujours- le fruit de tâtonnements empiriques et de réflexions collectives* ». Au-delà d'une volonté de ne pas enferme la démarche dans un cadre figé, cela est également dû au fait que la démarche a été motivée par des questions de terrain et non un débat théorique. De plus, les chercheurs qui la développent proviennent de différents horizons disciplinaires qui ont établi leurs propres référents théoriques. La démarche est elle-même en perpétuel développement (Barnaud, 2008). Comme mentionné précédemment, le principe de base est « *que les systèmes multi-agents constituent un paradigme de représentation des connaissances pertinent pour accompagner une recherche interdisciplinaire. Le modèle sert alors principalement d'objet médiateur aux discussions entre différents chercheurs ou acteurs engagés dans la co-construction d'un point de vue commun, conformément au cadre de l'interdisciplinarité proposé par Jolivet et Pavet (Jolivet et Pavé 1993).* » (Le Page, 2017 cité par Becu, 2020). Ainsi, les approches systémiques sont préférées aux approches sectorielles pour penser et appréhender les systèmes complexes. Elles reposent sur l'idée que le tout est plus que la somme de ses parties. Ainsi, les interactions entre les éléments qui constituent un système font émerger des propriétés qui ne sont pas observables au niveau de ces éléments (Barnaud, 2008). De plus, les systèmes complexes sont instables, incertains et donc difficilement prévisibles. Il est préférable d'essayer de mieux comprendre le système plutôt que d'essayer de prédire son évolution. Au-delà de cette compréhension, il est également important d'augmenter les capacités d'adaptation des acteurs vis-à-vis des évolutions du système.

La gestion est donc adaptative mais elle est aussi collective. La théorie d'Elinor Ostrom sur les biens communs (1990), que nous avons mentionné précédemment, a également fortement inspiré la démarche ComMod. Comme résumé par Barnaud (2008), Ostrom indique dans ses travaux que « *la coordination des multiples parties prenantes à différents niveaux d'organisation est considérée comme un facteur clef de l'émergence de règles d'usage autorisant une gestion des ressources écologiquement viable et socialement équitable* ». Pour la démarche ComMod, le processus d'apprentissage collectif est un élément central. Une autre posture épistémologique adoptée par la modélisation d'accompagnement est l'approche « constructiviste » qui considère que chaque individu construit sa propre représentation de la réalité en fonction de son vécu (Piaget, 2003 cité par Barnaud, 2008). Au contraire de l'approche positiviste qui considère que pour tout phénomène, il existe une réalité

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

unique, certaine et objective, l'approche constructiviste considère que la réalité est multiple, incertaine et subjective. Ainsi, les acteurs auront différentes perceptions de la réalité, des perceptions parfois contradictoires (Barnaud, 2008). Néanmoins, ces perceptions peuvent être modifiées notamment par l'apprentissage individuel. Différentes théories font écho aux préoccupations des chercheurs ComMod comme l'apprentissage « expérientiel » (ou « *learning by doing* ») de Kolb (1984, cité par Barnaud, 2008). L'apprentissage collectif est également un facteur clé. Selon Röling (2002, cité par Barnaud, 2008), l'apprentissage collectif est « *un déplacement depuis une cognition multiple vers une cognition collective ou distribuée* ». C'est-à-dire un déplacement d'une situation où les acteurs ne partagent rien ou pas grand-chose, à une situation où ils partagent de nombreuses perceptions leur mettant de s'engager ensemble dans une action collective malgré la persistance de perceptions différentes. Une autre posture épistémologique adoptée par la modélisation d'accompagnement est celle de la science « post-normale » développée par Funtowicz & Ravetz (1993). Compte tenu des incertitudes associés aux systèmes complexes mais également des enjeux sociaux amenant les acteurs à défendre des intérêts et des valeurs contradictoires, la justesse des décisions ne peut être garantie. Ainsi, pour Funtowicz & Ravetz (1993, cité par Becu, 2020), la qualité d'une décision se mesure dans la qualité du processus ayant mené à cette décision. En adoptant cette posture, la modélisation d'accompagnement considère le modèle non pas comme un outil « prédictif » mais comme un outil « exploratoire ». Ils permettent alors d'explorer différents chemins et hypothèses qui enrichissent la réflexion des utilisateurs des modèles.

En conclusion, la modélisation d'accompagnement est une démarche originale qui propose aux acteurs de s'appuyer sur la modélisation, et non le modèle, pour appréhender collectivement leur système et sa complexité. Après avoir présenté les différents fondements théoriques de la modélisation d'accompagnement, nous allons maintenant nous intéresser à ses principes.

- **Principes de la modélisation d'accompagnement**

La modélisation d'accompagnement est donc une démarche utilisant la modélisation pour accompagner les acteurs d'un système dans la construction d'une représentation partagée de leur système réel (le modèle). A travers la construction, la démarche accompagne les acteurs dans des processus de production de connaissances et des processus de décision collective. Comme indiqué précédemment, elle est historiquement mobilisée pour la gestion des systèmes des ressources naturelles. Ces systèmes sont complexes, ils ont de nombreuses incertitudes sur le fonctionnement et l'évolution de la situation. La démarche d'accompagnement a donc été construite pour permettre « *à des acteurs de partager leurs points de vue sur une question qui les concerne collectivement, afin qu'ils puissent s'engager dans la prise en charge de ces incertitudes* » (Association ComMod, 2013).

Les principes fondamentaux de la modélisation d'accompagnement sont formalisés dans une chartre, qui suggère un cadre « déontologique » pour son utilisation (Etienne *et al.,* 2010). D'abord publiée en 2003 en anglais puis en 2005 en français, un nouveau texte a été publié en 2013 dans la volonté de faire découvrir la démarche au-delà de la recherche. Les principes de la démarche concernent aussi bien ceux qui la conçoivent que ceux qui la mettent en œuvre. Ce sont des principes épistémologiques qui définissent les fondements du raisonnement scientifique, que nous avons présentés précédemment. Ce sont également des principes éthiques qui définissent des choix de posture (Association ComMod, 2013). La modélisation d'accompagnement est, en effet, d'abord une « posture » où le point de vue des chercheurs n'est qu'un point de vue parmi d'autres et où tous les points de vue et savoirs identifiés doivent être considérés. La démarche est structurée autour d'une question que les acteurs s'approprient pour la traiter collectivement. La démarche doit permettre le partage des points de vue lors de temps d'échange collectifs et en sous-groupes. Elle est réalisée par les « porteurs » de la démarche qui facilitent les échanges entre les « participants ». Compte tenu de

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

sa position, cela implique pour le porteur la nécessité d'une réflexion éthique sur sa pratique. Les idées mobilisées dans la construction du modèle « *doivent être explicitées et volontairement soumises à la réfutation collective des participants (experts et acteurs de terrain)* ». Le processus de construction fait l'objet de nombre va-et-vient entre la théorie et le terrain remettant ainsi en cause les hypothèses du modèle et de la démarche (Barnaud, 2008) (Figure 19). La démarche d'accompagnement est une démarche particulière : elle est transparente, adaptative, itérative et réflexive (Barnaud, 2008 ; Etienne *et al.,* 2010, Association ComMod, 2013).

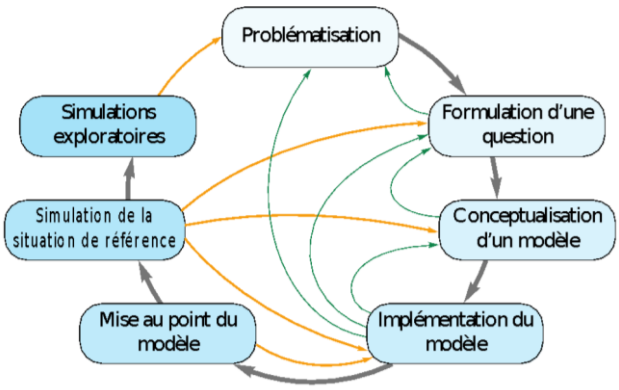


Figure 19 : Représentation du processus de modélisation participative (ComMod)

Enfin, dès le début de la mise en œuvre de la démarche sur le terrain, ses effets doivent être considérés, grâce notamment à une procédure de suivi. L'évaluation de ses effets produits permet de déterminer sa validité.

- **Présentation de la méthode ARDI**

La modélisation d'accompagnement mobilise différentes méthodes dont la méthode de conceptualisation « ARDI ». Cette méthode permet de construire le modèle sous forme d'un « schéma conceptuel ». Elle comprend quatre étapes, auxquelles vient généralement s'ajouter une étape initiale où les acteurs se mettent d'accord sur la problématique à résoudre. Cette étape de problématisation permet d'énoncer clairement la question posée, de la délimiter et bien définir ce qu'elle recouvre pour assurer un objectif commun. Ensuite, les quatre étapes se déroulent successivement :

1. Identification des **acteurs clés** (A) qui semblent pouvoir ou devoir joueur un rôle décisif par rapport à la problématique définie ;
2. Identification des **ressources clés** (R) mobilisées dans le cadre de la question posée ainsi que les informations essentielles à savoir ;
3. Identification des **dynamiques** (D) qui influencent le système et provoquent des changements tels que des dynamiques écologiques, économiques ou encore sociales ;
4. Identification des **interactions** (I) entre les acteurs et les ressources ou entre les acteurs eux-mêmes et aboutir ainsi au modèle conceptuel.

Ces étapes aboutissent à la production de différents diagrammes qui sont ensuite rassemblés et synthétisés pour produire le schéma conceptuel. Une fois le schéma établi, il est possible d'élaborer des propositions de gestion basées sur le modèle ou bien en faire un outil de concertation (Etienne, 2009).

Cet outil peut prendre différentes formes, dont le jeu de rôle qui est une des formes généralement privilégiées par les chercheurs qui utilisent la démarche ComMod (Barnaud, 2008). Les jeux de rôles,

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

tels qu'utilisés par les chercheurs du groupe ComMod sont définis comme « *des modèles (au sens large) permettant la mise en situation d'acteurs, à l'aide de différents supports (cartes, monnaie, etc.) et dispositifs qui les amènent à prendre des décisions d'actions répétées dans le temps en fonction du rôle qui leur est assigné, des contraintes qui leur sont imposées, et des interactions avec leur environnement physique et social* » (Barnaud, 2008). Grâce à sa mise en situation distancée de la réalité, les échanges entre les acteurs est facilité et permet d'explorer de nouvelles possibilités (Barnaud, 2008 ; Ferrand *et al.,* 2024). Les jeux de rôles permettent de simuler les systèmes réels en utilisant différentes formes de « jeu » et offrent la possibilité d'expérimenter et discuter les effets des décisions sans qu'il n'y ait de répercussion sur le réel (Stamm, 2017 ; Brougère, 2005 cité par Berry *et al.,* 2020). Certains praticiens de la modélisation d'accompagnement utilisent également le terme de « jeu sérieux » ou « simulation participative » (Becu, 2020).

Une simulation est définie comme « *la reproduction artificielle d'une situation réelle ou la mise en œuvre d'un modèle* » (Varenne, 2011 cité par Berry *et al.,* 2020). C'est donc une simplification du réel pour laquelle « *il existe une similitude pertinente entre des caractéristiques produites par la simulation et celles du système réel* ». Lorsqu'elle est participative, les utilisateurs peuvent, selon un certain nombre de règles, modifier certains éléments. Des modifications qui entraineront des effets sur la simulation (Berry *et al.,* 2020). Ainsi, la simulation participative peut être définie comme « *simulation jouée dont l'intention est explicitement participative, c'est-à-dire où les participants partagent le contrôle sur l'instrument (la simulation et son usage) dont découle des décisions pouvant les affecter. Elle se pratique lors de temps collectifs, organisés couramment dans le cadre d'ateliers. Elle donne un cadre permettant aux participants de construire collectivement des idées, des abstractions (concepts, stratégies, plans…), qui répondent à leurs intérêts. Elle intègre un modèle de simulation sous une forme informatisée et/ou haptique, ainsi que des temps de débriefing permettant une prise de recul et un échange autour des objectifs du temps collectif définis au départ* » (Becu, 2020). Un certain nombre d'outils de simulation participative et de jeux sérieux sont développés pour la gestion des ressources en eau (Aubert *et al.,* 2018). Leur sollicitation est croissante pour le secteur de l'assainissement et la valorisation des ressources (McConville *et al.,* 2023). Néanmoins, ils restent encore peu mobilisés (Lombard-Latune, 2019 ; Noury, 2021). A notre connaissance, il n'existe aucun outil de ce genre pour la gestion des risques associés à la REUT.

En résumé, la modélisation participative est une démarche particulièrement intéressante. Elle mobilise la modélisation, qui est une méthode intéressante pour appréhender les systèmes et notamment les systèmes complexes. En intégrant les « non-modélisateurs » dans le processus de modélisation, elle adopte une posture constructiviste et post-normale, qui considère le processus de construction du modèle comme un processus de production de connaissance et de décision. En construisant leur représentation commune, les acteurs prennent du recul par rapport à leur système, échangent leurs visions et apprennent à travailler collectivement (Ferrand *et al.,* 2024). Cette approche nous paraissait donc particulièrement intéressante pour construire collectivement la gestion des risques et répondre aux enjeux associés : partage des représentations et des connaissances, création de lien entre les différentes parties prenantes, prise en considération des attentes et des besoins et des spécificités locales… Le modèle peut ensuite prendre différentes formes dont celle d'un outil de simulation participative. La simulation permet d'explorer différents scénarios. Lorsqu'elle prend la forme du « *jeu de rôles* », il est attendu que les acteurs puissent mettre de côté leur réalité et leurs tensions pour simuler et explorer de nouvelles stratégies de manière collective. Cela semble particulièrement intéressant dans le cadre de l'introduction de cette nouvelle approche de gestion des risques sanitaires qui est l'approche *multi-barrières*. Nous avons donc choisi de mener une démarche de modélisation d'accompagnement pour développer une méthodologie permettant la construction collective de la gestion des risques microbiologiques. C'est le sujet de notre prochaine partie.

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

2.2 Une démarche de modélisation d'accompagnement pour co-construire un outil de simulation participative

Dans cette partie, nous allons présenter la démarche de modélisation d'accompagnement qui a été mise en place avec les acteurs du cas emblématique de la REUT agricole en France : le cas de Clermont-Ferrand. Il s'agit d'abord de présenter ce cas d'étude particulièrement intéressant tant par sa taille, l'expérience de ses acteurs que son organisation. La parution du RE 2020/741 a soulevé un ensemble d'interrogations chez les porteurs de projet et les services instructeurs concernant la mise en conformité. Nous montrerons comment la démarche de modélisation d'accompagnement présentait un accompagnement intéressant pour aborder cette mise en conformité. La première section sera donc consacrée à une présentation du contexte mais aussi à la méthodologie mise en place. Nous verrons qu'un outil de simulation participative a été construit grâce aux nombreux va-et-vient avec différents acteurs de Clermont-Ferrand. Dans un second temps, nous présenterons cet outil qui intègre le modèle d'évaluation et de gestion construit dans le chapitre 1 ainsi que différents éléments produits lors de la co-construction participative. Cet outil se positionne comme une méthode de la thèse pour construire collectivement la gestion des risques. Il a été utilisé avec le comité de suivi de Clermont-Ferrand qui rassemble d'autres acteurs au-delà de ceux impliqués dans le processus de modélisation. L'outil a également été utilisé sur deux autres cas de REUT agricole. Nous verrons que cela a amené différentes adaptations de l'outil, en plus des changements réglementaires qui ont eu lieu pendant la phase de construction. Ce sera le sujet de notre troisième section. Nous aborderons également, dans cette section, la procédure de suivi de la démarche et de ses effets qui a été mis en place.

2.2.1 Un processus de co-construction avec le cas de Clermont-Ferrand

2.2.1.1 Un cas emblématique de la REUT agricole qui nécessite une mise en conformité

Le cas de REUT de Clermont-Ferrand est un cas emblématique de la REUT en France. Le projet a démarré à la suite de la sécheresse de 1976, une des plus importantes qu'ait connue la France. Après un voyage en Californie, un Etat pionnier de la REUT, un agriculteur de la plaine de la Limagne voit l'intérêt de la réutilisation des eaux usées pour garantir la disponibilité en eau d'irrigation même pendant des périodes de sécheresse. Au-delà de la sécheresse de 1976, la plaine de la Limagne, située à l'est de Clermont-Ferrand, est confrontée à des déficits hydriques saisonniers. Il est dépourvu d'un réseau hydrographique superficiel naturel. Les rivières à proximité, notamment le Bédat et l'Artière qui sont deux affluents de la rivière Allier, n'ont pas un débit suffisant pour répondre à la demande en eau d'irrigation. A cette époque, les effluents de la sucrerie Bourdon, située à proximité de la station d'épuration de Clermont-Ferrand, sont traités par plusieurs lagunes. Une idée émerge alors : en dehors de la période de lavage des betteraves, les eaux usées traitées de la station d'épuration entre dans les lagunes, assurant ainsi une désinfection de ces eaux et permettant leur utilisation pour l'irrigation agricole. En contrepartie de la mise à disposition des lagunes, les agriculteurs épandent les eaux de lavages de betteraves sucrières dans leur champ en début de la période d'irrigation (avril). Pour porter le projet, les agriculteurs se structurent en une association syndicale autorisée : l'Association Syndicale de la Limagne Noire (ASA LN). La plupart des agriculteurs producteurs de betteraves sucrière font partie de l'ASA LN et sont également adhérents de la sucrerie, facilitant ainsi la coopération avec la sucrerie (Declercq *et al.,* 2020 ; Cerema, en cours de publication).

A cette époque, il n'existe pas encore de réglementation nationale sur la REUT. Il a fallu plus de dix ans pour que le projet se mette en œuvre compte tenu, notamment, des réticences associées à l'utilisation

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

des systèmes d'irrigation par aspersion basse pression. Les autorités sanitaires de l'époque redoutent une dispersion des micro-organismes pathogènes via les gouttelettes et les aérosols. Après sollicitation de l'avis du CSHPF, différentes précautions ont été prises à l'époque : atteinte des objectifs de qualité fixés par les directives de l'OMS de 1989, constitution d'un comité de pilotage, mise en place de précautions d'usage comme par exemple une distance supérieure à 100 mètres des habitations ou l'arrêt en cas de fort vent (> 30km/h) et restrictions de l'irrigation aux productions de semences et aux légumes consommées après transformation. La REUT a donc permis à l'époque le développement et la sécurisation de filières stratégiques comme le maïs semence et la betterave sucrière (Loubier & Declercq, 2014 ; Cerema, en cours de publication).

Différents changements ont eu lieu depuis le début du projet comme l'amélioration de la station d'épuration, les évolutions climatiques, les changements réglementaires avant la parution de l'arrêté du 02/08/2010 (modifié en 2014) puis le RE 2020/741. L'année 2019 a été marquée par la fermeture de la sucrerie. L'ASA LN est désormais en charge de l'entretien des lagunes. Actuellement, une partie des EUT de la STEP de Clermont-Ferrand est donc fournie gratuitement à l'ASA LN qui regroupe désormais une cinquantaine d'exploitations agricoles. La station d'épuration est d'une capacité de 450 000 Equivalents-Habitants (EH), soit environ 20 millions de m^3 traités par an. La filière de traitement est un procédé de boues activées. Elle est gérée par Clermont-Auvergne-Métropole (CAM), un établissement public de coopération intercommunale (EPCI) regroupant différentes communes. Un traitement complémentaire est ensuite apporté grâce aux lagunes situées à proximité de la STEP. Ce système est composé de huit lagunes successives sur un périmètre total de 12 hectares représentant une capacité d'environ 312 000 m^3 (Figure 20).



Figure 20 : Lagunes de maturation assurant la production des eaux réutilisées par l'ASA LN

Leur gestion et les coûts associés ainsi que ceux des réseaux d'acheminement des eaux de la STEP et de distribution sont assurés par l'ASA LN grâce en partie aux cotisations des adhérents. Les EUT sont ensuite utilisées d'avril à septembre sur un périmètre de 1 500 hectares, avec une capacité du réseau de distribution limitée à 740 hectares irrigués. Les volumes réutilisés varient chaque année en fonction de la pluviométrie et des besoins des cultures mais sont en moyenne de 1 304 626 m^3 (selon les données fournies par l'ASA LN). La part prélevée par l'ASA LN en sortie de la station est également variable selon les années. Par exemple, en 2020, 16 % du total rejeté entre avril et septembre était utilisé contre 5 % en 2021. Cette part est néanmoins limitée pour assurer un débit minimal de rejet dans la rivière servant d'exutoire à la STEP. Les grandes cultures irriguées en aspersion comme le maïs (grain et semence) et le blé représentent actuellement la majorité des parcelles irriguées. L'arrêt de la sucrerie, et donc de la demande locale en betterave sucrière, a amené certains agriculteurs à repenser leur assolement. Quelques exploitations irriguent également des légumes plein-champ comme la pomme de terre ou l'oignon. En effet, avec les évolutions climatiques, celles du marché mais aussi le plan d'alimentation territorial (PAT), certains agriculteurs se tournent aujourd'hui vers le maraichage de plein-champ.

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

Plusieurs études scientifiques ont été menées sur ce projet dont une étude épidémiologique (Devaux *et al.,* 2011). Elle a été réalisée entre 1996 et 1999 sur la population agricole et celle vivant à proximité des périmètres irrigués. A notre connaissance, c'est la seule étude de ce genre qui a été réalisée en France. Le cas de Clermont-Ferrand a également été l'objectif d'autres études comme l'étude de Courault *et al.* (2017) sur les risques liés à la dispersion des aérosols. Ces éléments nous ont apporté des informations intéressantes sur les risques sanitaires associés à l'utilisation des EUT pour le cas de Clermont-Ferrand. Il a également fait le sujet d'une analyse coûts-bénéfices (Declercq *et al.,* 2020). Un ensemble de données est donc disponible concernant ce cas d'étude. En plus de l'intérêt que représente l'expérience de plusieurs années des porteurs de projet, de nombreux acteurs sont impliqués via le comité de suivi. Ce comité, composé d'acteurs techniques, institutionnels, scientifiques et de la société civile, se réunit annuellement. Différentes informations y sont échangées et en particulier les résultats des analyses microbiologiques. Cette organisation multi-acteurs était donc particulièrement intéressante pour nos objectifs de recherche. Cette organisation est d'autant plus intéressante qu'elle est originale. En effet, avec la fermeture de la sucrerie, l'ASA LN est désormais en charge de l'entretien des lagunes et est responsable de la qualité des EUT réutilisées par les agriculteurs.

Notre prise de contact avec les porteurs de projet, le président de l'ASA LN et le bureau d'étude SOMIVAL Ingénierie qui accompagne le projet, a démarré en mars 2022. Par la suite, nous emploierons le terme « porteurs de projet » pour désigner ces acteurs. Cette prise de contact a été initiée par la DDT, qui est en charge de l'instruction du dossier, et par le Cerema qui apporte un accompagnement technique et scientifique. En 2022, la réglementation pour la REUT en France est en plein changement. Avec la publication du RE 2020/741 en 2020 et son entrée en vigueur prévue pour juin 2023, l'AF du 02/08/2010 allait bientôt être abrogé pour pouvoir intégrer les nouvelles exigences européennes. Le renforcement des exigences de qualité indiqué dans le RE 2020/741 nécessite la mise en conformité du cas de Clermont-Ferrand. En effet, les résultats de la campagne d'analyse de 2022 montrent que la concentration en *E.coli* dans les eaux en sortie de lagunes varie en moyenne entre <15 UFC/100mL et 213 UFC/100mL. Cela correspondait à une classe A dans l'ancienne réglementation française (≤ 250 UFC/100mL) mais à une classe B voire C selon les nouvelles exigences du RE 2020/741. Cette qualité est suffisante pour la majorité des exploitations (cultures semencières, industrielles…). Néanmoins, elle n'est pas suffisante pour l'irrigation de certains légumes plein-champ comme l'oignon ou la carotte. Au-delà des impacts sur la pérennité de certaines cultures actuellement irriguées, la non-atteinte d'une qualité A questionne d'éventuelles évolutions futures des assolements. C'est le cas notamment pour de nombreuses cultures maraîchères pour lesquelles la qualité A est exigée. Au moment de la prise de contact avec les porteurs de projet, l'AF du 18/12/2023 n'a pas encore été publié. Le RE 2020/741 est donc le texte de référence. L'Annexe I stipule que « *Les cultures relevant d'une catégorie donnée sont irriguées avec de l'eau de récupération de la classe minimale de qualité de l'eau de récupération correspondante (…), à moins que des barrières supplémentaires appropriées (…) ne soient utilisées qui permettent de satisfaire aux exigences de qualité indiquées* ». Ainsi, plusieurs options s'offrent à l'ASA LN pour sa mise en conformité :

- **Restreindre les usages** à ceux autorisés par la qualité B ou C mais qui impacterait alors les agriculteurs nécessitant une qualité A et contraindrait les évolutions futures ;
- **Ajouter une unité de traitement supplémentaire** pour garantir l'atteinte d'une qualité avec néanmoins l'incertitude de la capacité du laboratoire qui réalise leurs analyses à atteindre le seuil défini par la réglementation et l'ajout de coûts économiques et de contraintes organisationnelles ;
- **Maintenir le traitement** dans les niveaux actuels tout en assurant **que des mesures complémentaires** permettent de satisfaire aux exigences de qualité, ce qui nécessiterait alors une éventuelle implication des agriculteurs à l'échelle individuelle.

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

Compte tenu des impacts qui pourraient être associés à ces différentes options, une concertation avec l'ensemble des acteurs concernés est nécessaire. L'introduction de cette nouvelle approche de gestion des risques qui envisage la mise en place de *barrières* présente un intérêt particulier pour les porteurs de projet mais également des interrogations.

Nous avons donc proposé aux porteurs de projet, à la DDT ainsi qu'au Cerema de mettre en place une démarche de modélisation participative. Un groupe de modélisation a été constitué avec ces acteurs. L'objectif était de réaliser un atelier ARDI où un schéma conceptuel serait produit grâce à un processus de construction collective. Ce schéma conceptuel serait ensuite implémenté dans un outil de simulation participative qui accompagnerait la construction collective de la gestion des risques. Comme nous allons le voir dans la section suivante, il ne nous a pas été possible d'explorer entièrement les possibilités qu'offrait la modélisation participative du point de vue de l'intégration des acteurs dans la construction de l'outil. Néanmoins, cette construction a fait l'objet de nombreux aller-retour avec le terrain grâce à différents temps collectifs (ateliers, réunions, visite terrain…). Ces temps ont mobilisé différents acteurs aussi bien pour la construction de l'outil que pour son utilisation (Tableau 22).

	Participants													Aide		
Temps	ASA LN (OP)	SOM Ing (OP)	Agri (OP)	CAM (OP)	ChAgr (OP)	DDT (INS)	ARS (INS)	AE LB (INS)	Univ CF (STF)	CNRS (STF)	MSB (SCV)	FRANE (SCV)	UFC QC (SCV)	ECO FILAE (OP)	Cere-ma (INS)	Tot
Schéma concept. (05/22)	2	1	2	1	0	1		0	0					1	1	**9**
Risques (07/22)	2	2	1*	0	0	1	1	0	0	1	0			0	1	**9**
Visite terrain (08/22)	-	-	-												-	**-**
Test comité restreint (05/23)	2	2	3												1	**8**
Atelier comité de suivi (11/23)	1	2	1	1	1	2	1	1	1		1	1	0	1	1	**15**

*Légende : en vert = personne présente à l'atelier, en gris = personne conviée mais excusée, **en noir** = personne non sollicitée ; * = variation des individus représentant l'entité par rapport à l'atelier précédent ; Agri = agriculteurs membres de l'ASA LN ; AE LB = Agence de l'Eau Loire-Bretagne ; ChAgr = chambre d'Agriculture 63 ; FRANE = Fédération Région AuRA Nature Environnement (association environnementale) ;INS = acteur institutionnel ; MSB = Mairie de Saint-Beauzire, une commune situé à proximité du périmètre irrigué ;OP = acteur opérationnel ; SCV = acteur de la société civile ; STF = acteur scientifique ; Tot = nombre total de participants hors facilitateurs; UFC-QC = UFC-Que Choisir ; UnivCF = Université de Clermont-Ferrand.*

Tableau 22 : Entités présentes et nombre d'acteurs associés participant aux différents temps de co-construction de l'outil

Comme nous allons le voir dans les sections suivantes, les personnes associées aux différents temps ont été définies selon les objectifs de l'atelier, les choix des porteurs de projet mais aussi selon les disponibilités des participants. Certains acteurs comme les porteurs de projet et le Cerema ont été présent à étape de la démarche et ont constitué le « *noyau dur* » (Etienne, 2009).

2.2.1.2 Production d'un schéma conceptuel grâce à la méthode « ARDI »

Le groupe de modélisation a été initialement constitué avec les porteurs de projet, la DDT et le Cerema. Comme indiqué dans le Tableau 22 présenté précédemment, différents acteurs ont été identifiés et sollicités : des acteurs opérationnels (ASA LN, SOMIVAL Ingénierie, CAM, Chambre d'agriculture), institutionnels (DDT, AE LB) mais aussi scientifiques (Université de Clermont-Ferrand). Les acteurs de la société civile (comme par exemple, l'association environnementale et une des communes situées à proximité du périmètre irrigué qui font partie du comité de suivi) n'ont pas été associés. Lors de la constitution du groupe, il avait été convenu que le nombre de personnes ne dépasse pas dix personnes afin de faciliter les échanges. Les acteurs les plus « impliqués » actuellement dans la gestion des risques

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

du système ont été privilégiés, bien que cela soulève des interrogations en terme de représentation de l'ensemble des parties prenantes. *A posteriori,* nous pouvons regretter qu'ils n'aient pas participé au groupe de modélisation. En effet, nous verrons les associations environnementales sont finalement assez peu intégrées actuellement dans la gestion des risques et que les relations avec les autres parties prenantes ne sont pas toujours linéaires. Il aurait également pu être intéressant d'associer des associations de consommateurs voire même des consommateurs notamment ceux des produits maraîchers. Comme indiqué par Noury (2021), les associations de consommateur semblent actuellement absents sur la thématique de la REUT. Nous ferons le même constat lors des autres ateliers. Il aurait donc été intéressant de pouvoir associer ces acteurs pour intégrer l'ensemble des points de vue et avoir une vision plus globale du système, mais aussi pour encourager la collaboration entre les parties prenantes. Plusieurs schémas conceptuels auraient alors pu être produits et comparés. Néanmoins, nous verrons que l'intégration de ces acteurs n'a pas toujours possible et que les « contraintes » associés aux approches participatives ne nous ont pas permis d'envisager de réaliser différents ateliers ARDI.

- **Identification de la problématique (P)**

Les participants ont d'abord construit la problématique centrale à traiter collectivement (P). Les agriculteurs présents ont indiqué que la sécurisation de la production agricole actuelle est un enjeu crucial. Cette sécurisation passe par une sécurisation de l'accès à l'eau, qui est également importante pour envisager une diversification des cultures. Les grandes cultures représentent actuellement plus de 80 % du périmètre irrigué. Néanmoins, comme mentionné lors de la présentation du cas de Clermont-Ferrand, certains agriculteurs produisent également des légumes plein champ. La production de cultures maraîchères est actuellement très faible mais est également envisagée. Les raisons apportées pour ces évolutions des assolements sont notamment les impacts du changement climatique, l'intérêt grandissant des consommateurs pour du circuit court et les ambitions nationales de territorialisation de l'alimentation qui sont traduites notamment à travers les PAT. Les participants ont défini comme problématique (P) commune :

« *Comment sécuriser, développer et soutenir la diversification de la production agricole sur la plaine de la Limagne Noire* ? »

Bien que la problématique ne soit pas centrée sur les enjeux sanitaires, elle est intimement liée aux enjeux associés à la gestion des risques sanitaires. D'autres problématiques ont été indiquées par certains participants, notamment non opérationnels, en lien avec les enjeux quantitatifs : maintien du débit de l'Artière, sécurisation de la consommation en eau potable, réduction des volumes prélevés… Néanmoins, elles ont été considérés comme des « sous-problématiques », qui ne sont pas à négliger mais moins « prioritaires » actuellement compte tenu des enjeux associés à la mise en conformité vis-à-vis du RE 2020/741. En effet, la remise du dossier de mise en conformité aux services instructeurs était nécessaire pour autoriser la campagne d'irrigation de 2023. Nous verrons dans le chapitre 3 comment la démarche offre des perspectives intéressantes pour prendre en considération ces enjeux.

- **Etape 1 – Identification des Acteurs clés (A)**

Les participants ont identifié un large panel d'acteurs jouant un rôle décisif dans la problématique. Ces acteurs « clés » sont présentés en Annexe 4 p.254. Les rôles de chaque acteur ont été collectivement précisés. Ainsi, des précisions intéressantes ont été apportées par les participants. Par exemple, les agriculteurs ont indiqué qu'au-delà d'être des usagers des EUT ils sont également des consommateurs des produits irrigués : « *on est tous consommateurs ici* » (membre de l'ASA LN). Dans l'étude de Keraita *et al.* (2008), les agriculteurs n'étaient généralement pas consommateurs de leurs produits. Les auteurs ont indiqué que cela influençait leur perception des risques sanitaires associés à la réutilisation

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

des eaux et les amenait à considérer une absence de risques. Dans notre cas, les membres de l'ASA LN ont indiqué être des consommateurs et qu'ils seraient donc concernés si la REUT présentait d'éventuels risques. Néanmoins, la pratique ne semble pas perçue comme une pratique présentant particulièrement des risques : « *on se lave pas plus les mains parce que ce sont des EUT* » (membre de l'ASA LN). Les participants ont indiqué que les membres de l'ASA LN étaient à distinguer en trois catégories compte tenu des problématiques et des enjeux différents. Ainsi, certains agriculteurs tendent vers le développement du maraîchage mais « *le marché n'est pas toujours en adéquation* ». Or la présence d'un marché pour les cultures est un facteur important ainsi que le soutien des consommateurs. Ce sont donc également des acteurs clés. Cela fait écho aux informations identifiées dans la littérature concernant les restrictions des usages et l'importance de considérer les éventuels impacts associés sur les agriculteurs (Chapitre 1). Malgré une volonté de diversifier les filières, certaines cultures, comme les cultures semencières, permettent de sécuriser financièrement les agriculteurs. Elles sécurisent également la capacité de l'ASA LN puisque les cotisations des agriculteurs (calculées par rapport à la surface irriguée et à la consommation en eau) servent au fonctionnement du système. D'autres acteurs clés ont été identifiés comme les distributeurs. En effet, les distributeurs peuvent imposer un cahier des charges aux agriculteurs concernant notamment la qualité ou le délai entre la dernière irrigation et la récolte. Ainsi, des mesures de réduction des risques peuvent être imposées par des acteurs « post-irrigation ». Enfin, la personne de la DDT a apporté une précision intéressante sur son rôle indiquant qu'ils « *ne font pas la réglementation* » et qu'ils assurent son adaptation au terrain. Nous verrons dans le chapitre 3 que ce rôle de passerelle entre les prescriptions normatives et les applications opérationnelles n'est pas toujours évident et nécessite un accompagnement qui n'est pas toujours apporté aux acteurs institutionnels.

Cette étape a donc permis d'identifier un nombre important d'acteurs clés pour répondre à la problématique confirmant également la diversité des acteurs impliqués ou concernés.

- **Etape 2 – Identification des Ressources (R)**

De nombreuses ressources ont également été identifiées en lien avec la problématique. Elles sont présentées dans le Tableau 23. La classification proposée a été réalisée post-atelier afin de faciliter la compréhension de ces résultats.

« Eau »	« Matérielle »	« Institutionnelle »	« Fonctionnement »	Non classable
Potable *Pluviale et de pluie* *Usée traitée (STEP)* *Réutilisée* *Rivière* *Souterraine (forage)*	*STEP* *Matériel d'irrigation et de pompage* *Réseau* *Lagune* *Différents cultures*	*Schéma Directeur d'Assainissement* *Cahier des charges* *Réglementation* *Certification*	*Energie* *Argent* *Intrants (engrais, pesticides)* *Main d'œuvre* *Acceptabilité*	*Réserve Facilement utilisable (RFU)*

Tableau 23 : Ressources identifiées par les participants lors de l'atelier « ARDI »

Nous allons les aborder un peu plus en détail lors de la présentation des dynamiques.

- **Etape 3 et 4 – Identification des Dynamiques (D) et des Interactions (I)**

Les participants ont identifié différents processus affectant leur système :

- La fermeture de la sucrerie Bourdon en 2019 qui a entraîné l'arrêt de la production de la betterave sucrière pour de nombreuses exploitations et donc un changement des assolements ainsi que des interrogations concernant l'exploitation des lagunes. Un rachat d'une partie des lagunes par les agriculteurs était en cours de discussion ;
- Les récentes variations du coût de l'énergie dues, en partie, à la guerre en Ukraine ont également affecté l'ASA LN en particulier sur le réseau de distribution. Les lagunes étant un

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

système de traitement « extensif », les impacts économiques ont été limités indiquant ainsi l'intérêt de ce genre de système par rapport aux systèmes intensifs au-delà de leur relative facilité d'exploitation ;

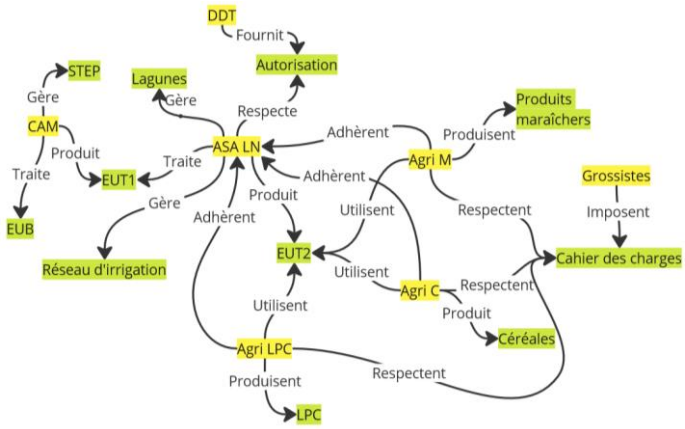
- Les choix liés à la gestion de l'eau du territoire, définis notamment à travers les schémas directeurs, sont également importants. Les débits d'étiage ont une influence sur les volumes qui doivent être rejetés par la station d'épuration et donc sur les volumes potentiellement réutilisables par l'ASA LN. Avec l'allongement de la saison d'irrigation, due en partie au dérèglement climatique, les besoins en eau augmentent. Un étalement croissant de la saison d'irrigation est également observé. Ces éléments ont une influence sur le choix des cultures ;
- Les épisodes de sécheresse de plus en plus fréquents affectent également l'acceptabilité de la société civile vis-à-vis de l'irrigation par aspersion, en particulier lors des périodes de restriction sur les usages. L'ASA LN n'a, pour l'instant, pas été soumise aux restriction d'usages puisque les eaux utilisées sont des EUT et non des eaux conventionnelles ;
- Enfin, les améliorations qui sont effectuées au niveau de la STEP influencent également la qualité de l'eau. C'est une dynamique intéressante, en particulier dans un contexte de révision de la Directive Eaux Résiduaires Urbaines de 1991, qui va amener différents changements en particulier concernant la gestion des risques sanitaires.

Il est intéressant de voir que l'acceptabilité des consommateurs n'a pas été mentionnée. Ce résultat peut s'expliquer par la faible proportion de cultures alimentaires actuellement irriguées dans le périmètre de l'ASA LN en comparaison avec les cultures céréalières.

Les discussions suscitées par la construction du schéma conceptuel n'ont pas permis d'aller jusqu'à l'identification des interactions acteurs/acteurs et acteurs/ressources et à la finalisation du schéma conceptuel. Un deuxième atelier devait être consacré à ces éléments et à une éventuelle implémentation du modèle avec les participants pour construire leur outil de concertation. Néanmoins, l'atelier « ARDI » s'est déroulé au début de la période estivale qui est une période de pleine activité pour les agriculteurs et également de congés. Certains participants du premier atelier n'ont pas pu être remobilisés pour le deuxième atelier. De plus, il avait été conclu lors du premier atelier « ARDI » que d'autres acteurs devaient être ajoutés au groupe du premier atelier. C'est le cas, par exemple, des acteurs institutionnels liés au sanitaire comme l'ARS, des acteurs de la société civile comme la mairie de Saint-Beauzire, une commune située dans le périmètre irrigué, ainsi que d'autres acteurs opérationnels comme les agriculteurs maraîchers. Compte tenu de cette variation dans le groupe de modélisation, il semblait difficile de finaliser la construction du schéma. De plus, la complexité des données identifiées lors de la construction du modèle d'évaluation et de gestion nous a amené à préférer l'implémentation du modèle sous la forme d'un outil de simulation participative en dehors du terrain.

Le schéma conceptuel a également été finalisé en dehors du terrain. Compte tenu du nombre important d'informations produites pendant l'atelier ARDI, nous avons effectué un recentrage autour de la problématique (Figure 21). Certains éléments identifiés ont été considérés comme plus ou moins décisif vis-à-vis de la problématique initialement définie.

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés



Légende : en jaune = Acteurs ; en vert = Ressources ; Agri M = Agriculteurs maraîchers ; Agri C = Agriculteurs céréaliers ; Agri LPC = Agriculteur de légumes en plein champ

Figure 21 : Schéma conceptuel réalisé à partir des données obtenues lors de l'atelier « ARDI »

Ce schéma conceptuel nous a permis d'identifier des éléments clés pour construire l'outil de concertation comme les rôles à proposer et les ressources à attribuer. Nous reviendrons sur ces éléments lors de la présentation de l'outil final. Ce schéma a été présenté au groupe de modélisation lors d'un deuxième atelier qui a été finalement consacré à la construction de scénarios d'exposition.

2.2.1.3 Enrichissement du modèle d'évaluation et de gestion des risques : construction des scénarios d'exposition et identification des pratiques existantes

Un deuxième atelier a donc été réalisé en juillet 2022 avec une partie des participants du premier atelier et d'autres entités comme le CNRS, l'ARS 63 ainsi que le Biau Jardin, une coopérative produisant des légumes en agriculture biologique. Cette coopération est adhérente à l'ASA. Certaines entités déjà absentes au premier atelier n'ont pas pu être présentes comme l'Université de Clermont-Ferrand, l'AE LB, le Chambre d'agriculture et la mairie de Saint-Beauzire. Compte tenu de l'intégration de plusieurs acteurs clés liés au sanitaire, ce deuxième atelier a été consacrée à une première discussion sur l'évaluation des risques. L'objectif était d'identifier, avec les participants, d'éventuelles populations exposées à intégrer à l'outil ainsi que des scénarios d'exposition pour compléter l'état de l'art et la base de données. En effet, l'adaptation des paramètres d'exposition pour réaliser une QMRA en se basant sur les dires d'experts ou d'acteurs opérationnels est une méthode utilisée dans la littérature (Busgang *et al.*, 2018 ; Hajare *et al.,* 2021).

Les participants ont d'abord rempli individuellement une fiche où ils devaient indiquer des scénarios d'exposition (populations exposées et voies) pour chaque maillon du système, du traitement des eaux usées à la consommation des produits. Ces scénarios peuvent concerner le fonctionnement du système en routine ainsi que lors d'éventuels défaillances. Une fois les scénarios identifiés, les participants devaient également estimer la fréquence de ce scénario (jour/an) et les mesures de gestion des risques existantes ou à mettre en place. Différents scénarios/défaillances ont donc été identifiés :

- une rupture de canalisations (pour une fréquence inférieure à une fois tous les cinq ans),
- un dysfonctionnement de la STEP (< une fois par an),
- l'absence d'UV pendant une longue période impact la contribution des lagunes (quelques jours/an),

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

- le dysfonctionnement d'une borne d'irrigation exposant ainsi l'agriculteur,
- des riverains qui reçoivent de l'EUT dans leur jardin,
- des promeneurs circulant sous la rampe d'irrigation (rare),
- un ouvrier qui consomment un des produits irrigués directement au champ.

L'attribution des fréquences pour chaque scénario les participants a été difficile, indiquant un besoin de méthodologie et d'un accompagnement pour mieux caractériser ces évènements. Différents éléments ont été abordés comme la nécessité de considérer certains évènements comme la circulation des non-professionnels circulant sur les périmètres irrigués ou venant à proximité des systèmes d'irrigation et la responsabilité des agriculteurs pour ces scénarios.

Une visite terrain a été réalisée en août 2022. Cette visite a permis de faire un point sur l'ensemble du système, en débutant par les lagunes et en allant discuter des pratiques avec deux agriculteurs qui avaient participé aux ateliers précédents. Cela a permis d'identifier des cultures irriguées, les systèmes d'irrigation utilisés (identification de plusieurs systèmes d'aspersion comme les rampes et les canons) ou encore les itinéraires techniques mis en place. Par exemple, l'entretien et la récolte du maïs sont généralement réalisés à l'aide de machines mais fait intervenir du personnel manuel pour sa castration. La construction du jeu de rôles, que nous aborderons dans la prochaine partie, s'est appuyée sur ces éléments. Les paramètres du modèle d'évaluation et de gestion des risques ont également été enrichis. Par exemple, la littérature englobe généralement l'ensemble du personnel agricole dans une même catégorie pour l'évaluation de l'exposition. Bien que les agriculteurs aient indiqué qu'ils étaient en charge de l'irrigation mais qu'ils intervenaient également pour l'entretien et la récolte, ils ont également indiqué l'intervention de personnels saisonniers notamment pour la castration manuelle du maïs semence. Les fréquences d'exposition associées ne sont pas les mêmes. L'étude épidémiologique réalisée à la fin des années 1990 s'est intéressée aux risques associés à la REUT pour les travailleurs saisonniers. A l'issue de cette étude, la castration manuelle avait été maintenue avec un délai préventif d'au moins 48 heures sans irrigation avant l'intervention du personnel et une formation des travailleurs saisonniers. Trois typologies de populations exposées ont donc été proposées pour le personnel agricole : le personnel d'irrigation, le personnel d'entretien et le personnel de récolte. L'objectif était de pouvoir aborder les différents moments d'exposition, de distinguer les paramètres d'exposition mais aussi les mesures *barrières* mises en place. Par exemple, concernant le personnel de castration du maïs, les agriculteurs ont indiqué qu'il intervient, au minimum, quatre jours après la dernière irrigation. En effet, un premier passage est d'abord réalisé à l'aide d'une machine. Compte tenu de la terre argileuse de la plaine de la Limagne, une attente de deux jours est nécessaire entre le passage de la machine mécanique et la dernière irrigation. Un premier passage de castration mécanique est réalisée pendant environ deux jours. Ainsi, un délai d'au minimum quatre jours est observé entre l'entrée dans le champ et la dernière irrigation. Un dépérissement naturel des micro-organismes pathogènes s'opère en particulier dans les conditions estivales caractérisées par de fortes températures et de rayonnements UV. D'autres mesures barrières ont été identifiées avec les agriculteurs : un accès aux lagunes qui est contrôlé, l'existence de panneaux contribuant à la sensibilisation du public, l'utilisation de systèmes d'irrigation localisés comme la micro-aspersion ou encore le séchage des oignons avant la distribution, l'irrigation de certaines cultures consommées crues uniquement en début de cycle (Figure 22).

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés





Figure 22 : Exemple de mesures barrières identifiées lors de la visite terrain

Ainsi, des mesures barrières sont donc déjà mises en place par les agriculteurs à travers les pratiques existantes. Ce constat confirme ainsi les résultats de la littérature (Keraita *et al.,* 2008 ; Karg & Drechsel, 2011). Comme indiqué par Keraita *et al.* (2008), les visites sur le terrain avec les acteurs opérationnels sont donc un outil intéressant pour réaliser une description du système existant, l'identification des pratiques mises en place et également encourager l'échange de savoirs et l'expression des besoins. Il aurait été intéressant de pouvoir réaliser cette en intégrant d'autres acteurs opérationnels que ceux liés au domaine agricole mais aussi des acteurs institutionnels et de la société civile. Nous aurions pu alors évaluer leur contribution à la compréhension mutuelle et à la construction des choix de gestion.

Pour résumer, le deuxième atelier ainsi que la visite terrain ont donc permis :

- **de réaliser une description du système, de détailler les pratiques agricoles et de définir les rôles à intégrer à l'outil** : *cultures irriguées, systèmes d'irrigation utilisés, calendrier d'entretien et de récolte, destination des cultures ….* ;
- **d'identifier des scénarios d'exposition à intégrer à l'outil et des paramètres de la QMRA** : *ingestion lors de la castration du maïs, présence de riverains à proximité du périmètre, distinction des personnels agricoles ;*
- **d'identifier certaines barrières déjà mises en place et de compléter la base de données** : *contrôle de l'accès aux lagunes, absence d'exposition lorsque les étapes d'entretien et de récolte des cultures sont réalisées à l'aide de machines mécaniques, séchage des cultures alimentaires comme l'oignon ; finalisation de l'irrigation avec d'autres sources ;*
- **des évènements dangereux et des défaillances du système** : *absence d'UV pendant une période de pluie, dysfonctionnement de la STEP, rupture d'une canalisation de distribution, intervention sur le réseau en fonctionnement, rafraîchissement des promeneurs avec le réseau, ouvriers qui consomment un fruit au champ.*

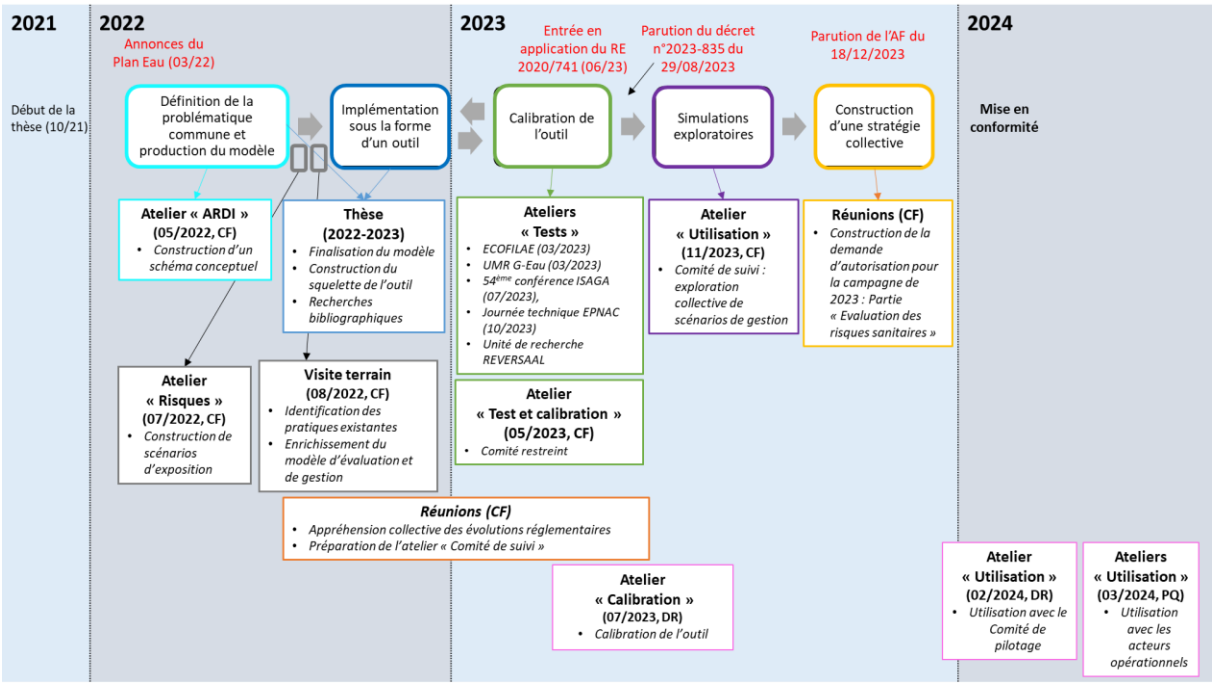
La construction du schéma conceptuel mais aussi les autres temps collectifs ont contribué à engager différents acteurs dans un processus d'apprentissage collectif et, dans une moindre mesure, dans un processus de décision collective. Ce processus s'est ensuite prolongé lors de l'utilisation de l'outil de simulation participative avec l'ensemble du comité de suivi. Ce sera le sujet de notre troisième chapitre.

Une phase de conception de l'outil a été réalisé à l'issu de la construction du schéma conceptuel. Elle a été réalisée en dehors du cadre de Clermont-Ferrand. Néanmoins, cette construction a été le fruit d'une réflexion collective grâce aux nombreux aller-retour qui ont été fait avec les acteurs de Clermont-Ferrand mais aussi grâce aux différentes sessions de test de l'outil (Figure 23). Ces sessions de test ont été réalisées avec différents publics : des acteurs de la recherche associés au traitement de l'eau (UR REVERSAAL – INRAE Lyon) et à la modélisation participative (UMR G-Eau), des acteurs opérationnels (ECOFILAE, Journée technique EPNAC[8]) mais aussi auprès d'une communauté

[8] *Journées techniques organisées par le groupe Epnac rassemblant des organismes publics de la gestion de l'eau en France*

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

internationale de praticiens impliqués dans le domaine de la simulation et des enjeux lors de la 54ème conférence organisée par l'*International Simulation and Gaming Association (ISAGA).* Un atelier « test » a également été réalisé à Clermont-Ferrand en mai 2023 en comité restreint (membres de l'ASA LN, la SOMIVAL Ingénierie et le Cerema) afin de tester son fonctionnement et valider ses paramètres avant de l'utiliser avec le comité de suivi.



Légende : AF = Arrêté français ; CF = Atelier de Clermont-Ferrand ; DR = Atelier de la Drôme ; PQ = Atelier de Porquerolles : RE = règlement européen

Figure 23: Temps de co-construction et d'utilisation de l'outil de simulation participative

La construction de l'outil s'est également faite en parallèle des différents changements réglementaires (Figure 23, *en rouge*). Nous allons nous intéresser aux adaptations de l'outil qu'ont nécessité ces changements mais aussi les différents contextes des autres cas d'étude où a été mobilisé l'outil (Figure 23, *en rose*). Avant d'aborder ce sujet, il s'agit de présenter l'outil de simulation participative qui a été construit à l'issue de ces différents temps de co-construction et de recherches bibliographiques.

2.2.2 La production d'un outil de simulation participative : l'outil Multiware

2.2.2.1 La construction d'une méthodologie pour répondre aux objectifs de recherche et du terrain

Pour rappel, le dispositif participatif s'inscrit dans un contexte de changements réglementaires et de l'introduction d'une nouvelle approche de gestion des risques qui est l'approche multi-barrières. Pour les acteurs de Clermont-Ferrand, les objectifs associés à la démarche sont i) d'avoir un accompagnement « scientifique » concernant les approches envisageables, les contributions sanitaires associées mais aussi les impacts économiques et organisationnels, ii) d'avoir un accompagnement « méthodologique » pour la construction des choix de mise en conformité avec le comité de suivi et iii) produire des données pour le dossier de mise en conformité. Comme explicité en introduction, des enjeux de recherche sont également associés à la démarche mais plus particulièrement à l'outil de concertation produit par la co-construction participative. En effet, dans le cadre de cette recherche, nous nous intéressons aux apports que pourraient avoir une construction collective de la gestion de risques microbiologiques. Ainsi, l'outil de concertation est considéré, dans notre cas, comme une

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

méthodologie pour construire collectivement la gestion des risques et permettre l'évaluation des contributions associées pour tenter de répondre à la question de recherche. En début de ce deuxième chapitre, nous avons identifié différents enjeux non-négligeables associés à la construction collective : apport de connaissances scientifiques et opérationnelles, partage des représentations sur les risques et les mesures de gestion, apport des spécificités du terrain, création de lien entre les parties prenantes, intégration des différentes parties prenantes…Les objectifs associés à l'outil sont les suivants :

- **Construction de scénarios de gestion des risques :**
    - Exploration de nouvelles possibilités de gestion (notamment l'approche multi-barrières) ;
    - Simulation des impacts sanitaires (QMRA) et économiques (coûts d'investissement et opérationnels) associés aux scénarios produits et comparaison de ces impacts ;
    - Transfert des connaissances issues du modèle d'évaluation et de gestion des risques (cadre réglementaire, risques, mesures barrières…) mais aussi des connaissances individuelles des différents utilisateurs pour produire un socle commun de connaissances ;
- **Construction collective :**
    - Confrontation des points de vue des parties prenantes et partage des représentations ;
    - Production de connaissances collectives à travers la construction des scénarios ;
    - Production d'une décision partagée par les participants à l'issu de l'atelier ;
- **Analyse réflexive du modèle d'évaluation et de gestion :**
    - Evaluer les paramètres du modèle et la contribution de la QMRA pour la construction de scénarios de gestion.

Nous reviendrons plus en détail sur les objectifs de recherche et la méthodologie utilisée au-delà de l'outil pour évaluer nos résultats au regard de notre question de recherche. Nous allons d'abord présenter l'outil qui a été développé.

Comme indiqué précédemment, la construction de l'outil a été itérative. Des évolutions ont eu lieu au fil des sessions de test : modifications des paramètres de l'outil, des tours de jeu, des supports mobilisés... Les changements réglementaires, et notamment la parution de l'AF du 12/12/2023, ont également nécessité des modifications, de même que les évolutions de recherches bibliographiques. Enfin, son utilisation en condition « réelle » avec le comité de suivi de Clermont-Ferrand ainsi que sur deux autres cas de REUT agricole a également amené des adaptations. Malgré ces adaptations, le *game-design* du jeu de rôles est demeuré relativement stable entre les trois ateliers menés en conditions réelles. La section suivante sera donc consacrée à une présentation générale de l'outil. Nous verrons ensuite les réflexions qui ont été menées autour de son adaptation aux spécificités des différents cas d'étude ainsi que les impacts associés aux évolutions des paramètres. Nous présenterons l'outil dans sa version utilisée dans le cadre de la thèse. Nous verrons dans le chapitre 3 que l'utilisation de l'outil sur les cas d'étude amènent des perspectives d'évolutions des différents éléments qui le constituent.

2.2.2.2 Présentation de l'outil Multiware dans sa version utilisée pour la thèse

- **Présentation générale**

L'outil « Multiware », pour *MULTI-actors, MULTI-barriers, MULTI-WAter REuse,* est un outil de simulation participative qui permet de construire, simuler et tester collectivement des scénarios de gestion des risques pathogènes pour la REUT agricole. Il prend la forme d'un jeu de rôles qui est animé par un facilitateur, un rôle que j'ai occupé pour les trois ateliers. Pour cela, j'ai été formé à travers

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

l'école chercheurs ComMod. Chaque session de « simulation », c'est-à-dire d'utilisation de l'outil sous la forme d'un jeu de rôles, dure ½ journée. Nous verrons dans le chapitre 3 que certains supports de l'outil peuvent être utilisés lors d'autres ateliers qui ne prennent pas nécessairement la forme d'un jeu de rôles.

Multiware est composé de différents supports physiques ainsi que d'un modèle informatique sous *Excel.* Nous avons fait le choix de concevoir un dispositif « hybride », c'est-à-dire à la fois haptique et informatisé. En effet, le modèle informatique nous permet de réaliser l'évaluation quantitative des risques (QMRA) et la simulation des impacts économiques. Les dispositifs informatiques présentent des intérêts dans la visualisation et la projection des résultats. Nous avons également conçu différents supports physiques (plateau, cartes…). Bien qu'ils nécessitent plus de matériels techniques en comparaison avec les supports informatiques, les supports physiques contribuent à l'apprentissage expérientiel et aux interactions sociales (Crookall *et al.,* 1986 ; Becu *et al.,* 2010a cités par Becu, 2020). Ainsi, différents supports physiques sont mobilisés :

- Un plateau physique qui représente un cas « fictif » de réutilisation des eaux usées depuis la production des eaux usées jusqu'à la consommation des produits finaux (Figure 24) ;
- Des cartes représentant les mesures « barrières » (Figure 25), les populations exposées et les voies d'exposition ;
- Des fiches d'aide pour accompagner les joueurs dans leur immersion dans leur rôle et la construction des scénarios de gestion (Figure 24).

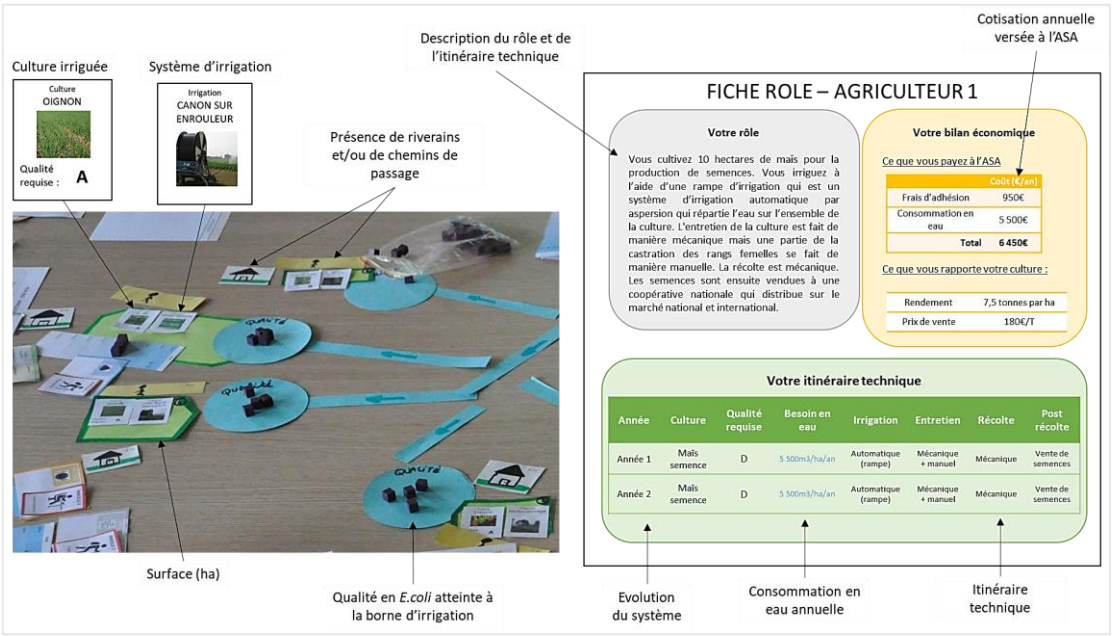


Figure 24 : Plateau de Multiware avec les différents éléments symbolisant les rôles (à gauche) et présentation d'un exemple de fiche de rôle attribué à chaque joueur (à droite) (version utilisée à Porquerolles, non définitive)

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

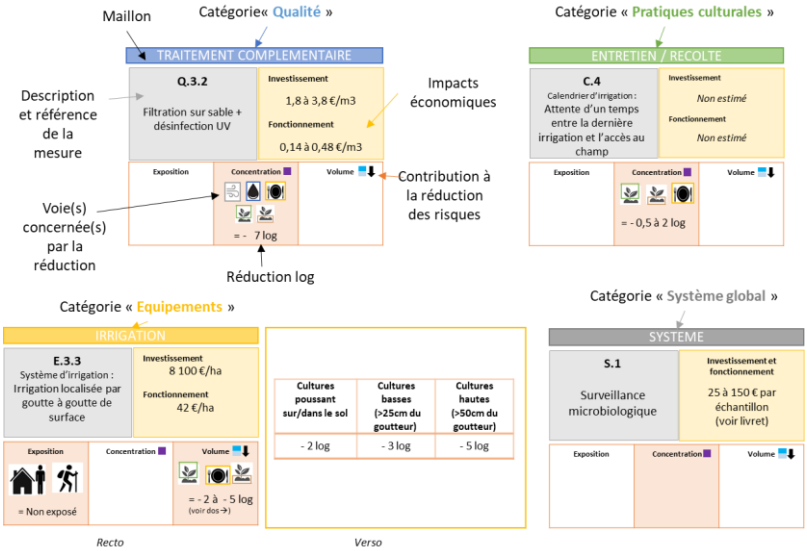


Figure 25 : Exemples de cartes « mesures barrières » pour les différentes catégories et des indications fournies aux joueurs (version utilisée à Clermont-Ferrand, non définitive)

Les joueurs incarnent des agriculteurs structurés en association qui bénéficient gratuitement d'une partie des eaux usées produites par la station d'épuration de la commune. Cette station est gérée par la collectivité qui est incarnée par un des facilitateurs. Les rôles et leur distribution ont varié entre les ateliers. Des rôles ont disparu comme celui des habitants de la commune, d'autres comme celui de la collectivité a été incarné par des participants puis par le facilitateur. Le président de l'association des agriculteurs a d'abord été un rôle à part entière puis a été intégré dans un des rôles « agriculteur ». Ainsi, au final seuls les rôles « agriculteurs » ont été maintenu. Nous reviendrons sur ces changements ultérieurement. Le nombre total de rôles a donc également varié selon les ateliers, ne dépassant néanmoins pas plus de huit rôles. Chaque rôle est incarné par un joueur ou en binôme, pour un total maximum de douze joueurs par session. Ce nombre est limité pour assurer les échanges entre les joueurs, faciliter le partage d'informations et l'expression des représentations individuelles.

Chaque rôle « agriculteur » est caractérisé par différents éléments : une culture irriguée, un système d'irrigation, une qualité à atteindre, un itinéraire technique, une surface agricole, une consommation en eau et une cotisation annuelle versée à l'association des agriculteurs. Pour les trois ateliers, les rôles des agriculteurs ont été définis en amont des ateliers avec les porteurs de projet. Ils ont été réfléchis pour répondre à différents objectifs : i) illustrer la réalité actuelle afin de pouvoir analyser l'existant, ses intérêts et ses limites ii) envisager des perspectives futures et iii) aborder les notions clés liées à l'évaluation et à la gestion des risques et les enjeux associés (par exemple, différentes qualités nécessaires). Comme indiqué sur la Figure 24 présentée précédemment, chaque joueur possède une fiche « rôle » résumant ces éléments. Ils sont également représentés sur l'espace commun, symbolisé par le plateau, assurant ainsi une visibilité collective des différents rôles.

- **Objectifs pour les joueurs et organisation de la session**

L'objectif pour les joueurs est d'assurer que les risques associés aux micro-organismes pathogènes soient suffisamment gérés et répondent aux objectifs réglementaires. Ainsi, deux approches sont envisageables pour répondre cet objectif :

i) Atteindre la qualité requise pour chaque parcelle grâce à la mise en place d'une unité de traitement supplémentaire (approche « traitement avancé ») ;
ii) Atteindre les objectifs liés à la santé grâce à la mise en place de barrières (approche « multi-barrières »).

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

La simulation est donc organisée en deux tours qui permettent aux joueurs de construire au moins un scénario pour chaque approche, pour ensuite les comparer et définir collectivement leur scénario « idéal ». La session dure au total 3h30 (Tableau 24).

Phase	**Briefing**	**Simulation**			**Débriefing**
		Introduction	*Tour 1*	*Tour 2*	
Durée	15min	30min	1h	1h	45min
Objectifs	Explication du déroulé	Immersion Compréhension individuelle et collective du système	Construction du scénario 1 « atteinte de la qualité requise »	Construction du scénario 2 « atteinte des objectifs liés à la santé »	Comparaison des scénarios Retour sur les actions menées pendant la session Lien avec la réalité
Eléments abordés	But de la session Règles du jeu	Rôles Système existant Réglementation	Qualité à atteindre pour chaque culture Traitement existant et à mettre en place	Populations exposées, voies d'exposition, dose d'exposition Barrières existantes et à mettre en place	Impacts sanitaires, économiques, organisationnels Transposition au système réel

Tableau 24 : Déroulé de la session d'utilisation de l'outil et éléments abordés pendant chaque phase

Après une présentation du déroulé de la session et des règles du jeu, la simulation débute. Chacun son tour, les joueurs décrivent leur système aux autres participants : cultures irriguées, équipements d'irrigation utilisées, itinéraire technique mis en place… Ce préambule permet de connaitre l'ensemble des rôles et fait écho à la première étape d'un plan de gestion des risques qui est la description du système (Maffettone & Gawlik, 2022). Le facilitateur, que j'ai incarné pour l'ensemble des ateliers, présente aux joueurs les deux approches de gestion envisagées par la réglementation ainsi que les différentes étapes qui mèneront à la construction des différents scénarios (Figure 26).

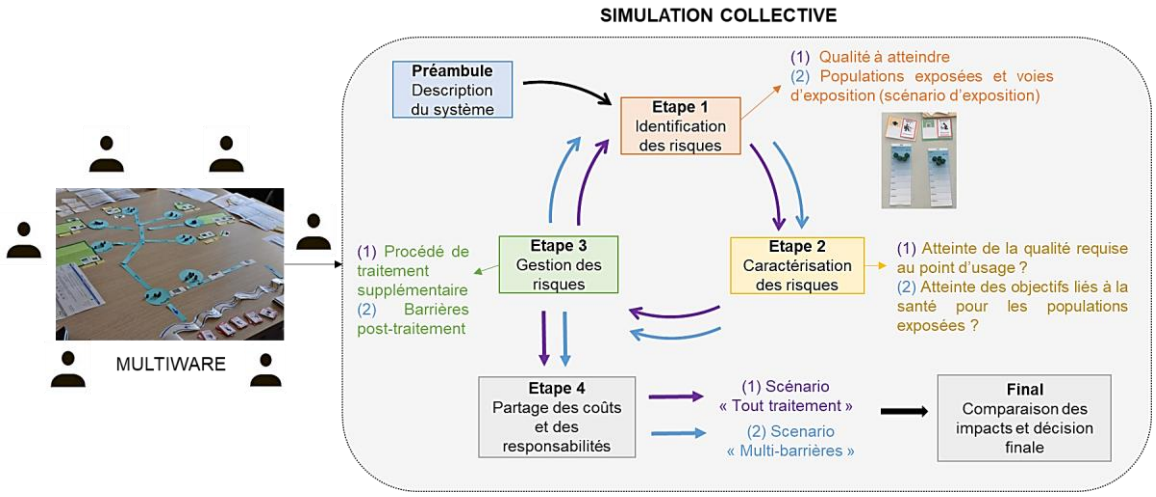


Figure 26 : Organisation des différentes étapes de la simulation menant à la production des scénarios

- **Premier tour – Production du scénario « atteinte de la qualité »**

Le premier tour est consacré à la construction du scénario « Tout traitement ». Ainsi, la réglementation exige d'atteindre une qualité des EUT qui varie selon l'usage. Ainsi, la première étape consiste pour les joueurs à identifier collectivement la qualité requise pour chaque parcelle (Figure 26, scénario 1 - Etape 1). La station d'épuration (boues activées) contribue à une réduction de 2 log de la concentration en *E.coli*, qui est symbolisée par des billes circulant sur le plateau. Contrairement à l'AF du 02/08/2010, le RE 2020/741 impose uniquement le suivi de *E.coli.* Ainsi, dans la version construite pour Clermont-Ferrand, nous avons représenté uniquement la concentration en *E.coli* sur le plateau. Comme nous l'avons indiqué dans le chapitre 1, c'est un indicateur qui est beaucoup utilisé pour le suivi

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

microbiologique de la qualité de l'eau. Il représente néanmoins des limites pour représenter certaines bactéries mais aussi les virus et les protozoaires. Dans l'AF du 18/12/2023, paru après l'atelier de Clermont-Ferrand, le suivi des virus et des protozoaires est également exigé. Néanmoins, nous avons choisi de ne pas représenter ces éléments sur le plateau afin de faciliter la compréhension des joueurs. Cela permettait également d'introduire les limites associées à cet indicateur lors de la construction du scénario « multi-barrières ». Dans notre cas fictif, la réduction de la station d'épuration permet de produire une eau réutilisée de qualité D (≤ 10 000 UFC/100mL). Ce choix a été fait afin d'avoir un cas d'étude où la qualité requise était atteinte pour au moins un des joueurs.

La qualité exigée est donc atteinte pour certains joueurs mais pas pour d'autres (Figure 26, scénario 1 - Etape 2). Une unité de traitement supplémentaire doit alors être mise en place pour atteindre la qualité requise (Figure 26, scénario 1 - Etape 3). Une discussion collective débute donc entre les joueurs pour répondre aux éléments suivants :

- Quel(s) procédé(s) mettre en place pour atteindre la qualité requise pour chaque parcelle (mesures de la catégorie « Qualité »)?
- A quelle échelle (individuelle, semi-collective, collective) ?
- Quelle répartition des coûts d'investissement et opérationnels ?
- Quel partage des responsabilités ?

Un livret apporte des informations supplémentaires aux cartes « mesures barrières » pour aider les joueurs à réaliser leur choix. Une simulation des coûts d'investissements et opérationnels est réalisée en direct grâce au modèle *Excel.* Les joueurs peuvent simuler la mise en place de différentes mesures, à différentes échelles et tester différentes répartitions des coûts. D'autres coûts peuvent également être ajoutés et simulés comme les coûts associés à la mise en place d'une unité de stockage et au suivi microbiologique. Les responsables en charge de la mise en place mais aussi du fonctionnement de l'unité de traitement sont désignés. A la fin de ce tour, les participants ont donc produit un premier scénario.

L'objectif de ce tour est d'apporter différentes notions comme les exigences réglementaires de qualité définies selon les cultures irriguées et les systèmes d'irrigation, les types de micro-organismes pathogènes, les procédés de traitement envisageables ou encore les combinaisons possibles. Le processus de construction doit également permettre aux joueurs d'apporteur leurs connaissances et d'exprimer leur avis concernant l'approche « tout traitement ». L'objectif est d'identifier les critères de choix des joueurs concernant l'unité de traitement mais aussi la répartition, ainsi que les intérêts et les limites associées à cette approche.

- **Deuxième tour – Production du scénario « atteinte des objectifs liés à la santé »**

Pour la construction du deuxième scénario, les joueurs repartent de la situation initiale (sans l'unité de traitement supplémentaire choisie au premier tour). L'objectif n'est plus un objectif de qualité mais un objectif de santé à atteindre défini selon les directives de l'OMS : 10^{-6} DALYs par personne et par an (pppa). Ainsi, l'objectif n'est plus uniquement de réduire la concentration dans l'eau réutilisée mais de diminuer la dose d'exposition jusqu'à un niveau tolérable (WHO, 2006). Ce tour est composé de différentes étapes : 1) construction collective des scénarios d'exposition, c'est-à-dire identification des populations exposées et des voies d'exposition par lesquelles elles sont exposées, 2) estimation des DALYs perdus pppa grâce au modèle informatique en intégrant la contribution des mesures de gestion déjà mises en place et 3) identification des mesures barrières supplémentaires à mettre en place (Figure 27).

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

Pour construire les scénarios d'exposition, différents supports physiques sont à disposition des joueurs : des cartes « populations exposées » et « voies d'exposition » qui reprennent les données du modèle d'évaluation (Chapitre 1) (Figure 27).

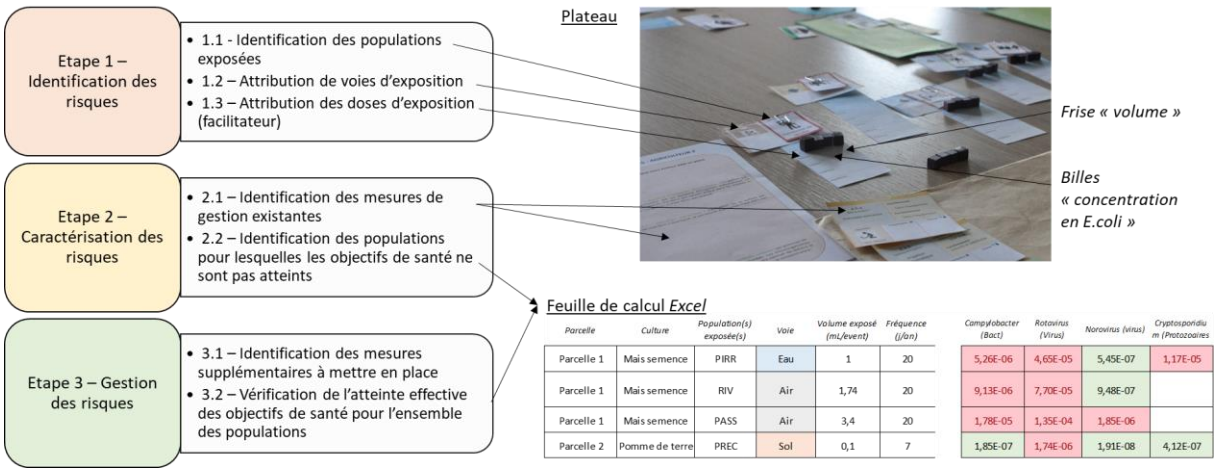


Figure 27 : Etapes et supports permettant la construction du scénario « multi-barrières »

Les joueurs construisent leurs scénarios à partir des caractéristiques de leur système. En effet, des mesures *barrières* contribuent à empêcher l'exposition de certaines populations comme par exemple le type de cultures irriguées ou les système d'irrigation utilisés. Ces mesures *barrières* existantes sont donc prédéfinies dans le rôle des joueurs. Elles sont indiquées sur les fiches « joueurs » contrairement aux scénarios d'exposition. En effet, les objectifs associés sont différents. Pour les scénarios d'exposition, l'objectif était de permettre l'expression des représentations des différents joueurs concernant les risques et de les confronter. Concernant les scénarios de gestion, l'objectif était de mettre en avant les pratiques existantes. Une fois les scénarios d'exposition établis, l'animateur en charge du remplissage de l'ordinateur les intègre dans le modèle *Excel.* A partir des données du modèle, un volume d'exposition et une fréquence de l'évènement (j/an) sont attribuées pour chaque scénario. Ces informations sont également transmises aux joueurs qui les indiquent sur une frise « volume » (Figure 27).

Si certaines mesures *barrières* contribuent à empêcher l'exposition, d'autres contribuent à réduire la dose d'exposition en agissant sur la concentration en micro-organismes ou sur le volume d'exposition. Grâce au modèle informatique, une QMRA est réalisée en direct (Figure 27, Etape 2). La gestion des risques n'est plus définie par rapport à l'indicateur de contamination fécale *E.coli* mais par rapport à des micro-organismes présentant un risque pour la santé humaine. Ainsi, une évaluation des risques est faite pour les trois types de microorganismes : *Campylobacter j.* (bactéries), norovirus (virus), rotavirus (virus) et *C.parvum* (protozoaires). Si les objectifs liés à la santé ne sont pas atteints pour l'ensemble des populations exposées, les participants identifient les barrières supplémentaires, individuelles ou collectives, à mettre en place pour réduire les risques jusqu'à atteindre l'objectif du 10^{-6} DALYs (Figure 27, Etape 3). Des cartes « barrières » sont à disposition des joueurs ainsi que dans le livret informatif. Grâce au modèle informatiques, les joueurs simulent différentes combinaisons de barrières et discutent collectivement des contributions sanitaires associées, des impacts organisationnels et économiques. Un scénario « multi-barrières » est alors produit.

L'objectif associé au processus de construction de ce scénario est d'apporter différentes connaissances concernant les risques mais aussi les mesures *barrières.* Une autre façon d'évaluer et de gérer les risques est proposée en intégrant la notion de « dose d'exposition ». L'objectif est également de permettre aux joueurs d'exprimer leur perception des risques et de la travailler collectivement grâce aux informations apportées par l'outil mais aussi par les autres participants. Enfin, ce scénario aborde également la contribution des pratiques existantes. Le but est de pouvoir mettre en discussion les

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

paramètres du modèle d'évaluation et de gestion et de permettre aux différents utilisateurs de s'exprimer sur ces mesures, leur faisabilité et éventuellement d'en indiquer d'autres qui ne seraient pas nécessairement intégrées dans notre base de données.

- **Comparaison des scénarios et débriefing de la session**

La session de simulation participative se termine par un temps consacré à la comparaison des impacts sanitaires, organisationnels, techniques et économiques associées aux deux scénarios. Ensuite, le temps du débriefing débute. Cette phase est essentielle pour transformer l'expérience du jeu en apprentissage (Crookall, 2010). Elle se déroule en plusieurs temps. D'abord, le débriefing permet aux joueurs de partager leur expérience de la session de jeu et notamment les émotions ressenties. L'objectif est qu'ils puissent revenir sur les évènements qui ont eu lieu pendant le jeu (actions, faits marquants…). Des explications collectives sont apportées pour mettre en perspective ces éléments, les comportements des joueurs et les stratégies individuelles et collectives ayant amené à ces résultats. Nous l'aborderons ultérieurement mais généralement des personnes extérieures au groupe de joueurs « observent » la session de simulation. Leurs observations enrichissent le débriefing. Ensuite, un retour vers la situation réelle est réalisé. Cela permet aux participants de mener une réflexion collective sur l'utilisation des résultats sur leur cas réel. Cette réflexion peut se traduire par une recherche de solutions ou de nouvelles pistes d'évolutions (Hassenforder *et al.,* 2020b).

Nous venons donc de présenter l'outil Multiware, les objectifs associés à chaque tour, les supports mobilisables et les productions attendues. Il s'agit désormais de l'utiliser sur différents cas d'étude pour tenter de répondre à nos enjeux de recherche mais aussi de répondre aux objectifs des acteurs opérationnels.

2.3 Utilisation de l'outil sur différents cas de REUT agricole

Dans la continuité de la démarche d'accompagnement, l'objectif était d'utiliser l'outil de simulation participative avec d'autres acteurs au-delà de ceux qui avaient participé à la co-construction et notamment avec le comité de suivi. Ce comité de suivi rassemble des acteurs institutionnels, opérationnels, scientifiques et la société civile. Comme indiqué lors de la présentation du cas de Clermont-Ferrand, l'objectif pour les porteurs de projet était d'aborder la mise en conformité avec les membres du comité de suivi. Pour nos objectifs de recherche, compte tenu de la composition du comité et des objectifs associés à l'atelier, c'était un premier cas d'étude intéressant. Il nous semblait également important d'utiliser l'outil sur un autre cas de REUT agricole existant. L'objectif était d'éprouver les résultats obtenus lors de l'atelier de construction collective réalisé à Clermont-Ferrand. Nous voulions également identifier les invariants et les variantes de l'outil pour, à terme, tenter de développer une version générique qui pourrait être utilisée au-delà du cadre de la thèse. Le cas de REUT agricole de l'île de Porquerolles présente quelques similarités avec celui de Clermont-Ferrand dans son fonctionnement mais aussi dans les réflexions concernant les évolutions des usages et celles concernant la mise en conformité vis-à-vis des changements réglementaires. L'outil a été utilisé lors d'un atelier avec différents acteurs de ce cas. Pour les mêmes objectifs associés à l'utilisation de l'outil sur le cas de Porquerolles, l'outil a également été utilisé avec un projet de REUT agricole en construction dans la Drôme. Dans un premier temps, une description des deux cas d'étude sera faite ainsi qu'une présentation des attentes des porteurs de projet vis-à-vis de la méthode. Ces éléments de contexte sont importants à comprendre, car ils nous ont amené à adapter l'organisation de l'atelier mais aussi à adapter l'outil. Nous présenterons ces évolutions dans un second temps. Les conclusions associées à ces évolutions seront néanmoins abordées dans le chapitre 3. Dans un troisième temps, nous décrierons la méthodologie que nous avons mise en place pour évaluer les résultats obtenus lors des ateliers et notre méthodologie.

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

2.3.1 Présentation des deux autres cas d'étude retenus

2.3.1.1 Un autre cas emblématique de la REUT agricole : le cas de Porquerolles (Provence-Alpes-Côte d'Azur)

A la suite d'un échange avec l'ASA LN, le Parc National de Port-Cros (PNPC) nous a sollicité en janvier 2023 pour utiliser l'outil sur leur cas. La réutilisation des eaux usées sur l'île de Porquerolles est un autre cas emblématique de la REUT en France. Il a démarré dans les années 80 afin de répondre aux besoins en irrigation des vergers de conservation. Les caractéristiques techniques de la filière de traitement sont assez similaires à celles de Clermont-Ferrand : une station d'épuration par boues activées (4 500EH) suivi d'un traitement par lagunage (3 bassins). La STEP appartient à la Métropole Toulon Provence Méditerranée (MTPM) et les lagunes au PNPC. VEOLIA Eau est le délégataire pour la collecte et le traitement. Jusqu'à présent, elle assurait également l'exploitation et le suivi des lagunes. Depuis un changement récent, c'est désormais le PNPC qui en a la responsabilité.

Contrairement au cas de Clermont-Ferrand, les lagunes assurent le traitement complémentaire de 100% du rejet de la STEP. A la sortie du lagunage, après une filtration par un filtre à sable, un réseau d'irrigation distribue aux vergers (16ha), qui appartiennent également au PNPC, pour une surface totale équipée pour l'irrigation de 30 ha. La conduite de l'irrigation et du cycle cultural est assurée par le Conservatoire Botanique et l'Association Sauvegarde Des Forêts Varoises (ASDFV). Les vergers (mûriers, figuiers…) appartiennent également au PNPC, sont irrigués en goutte à goutte de mai à septembre. Les volumes réutilisés représentent jusqu'à 350m^3/j soit en moyenne 53 550 m^3 pour les 5 mois de campagne. Les productions sont généralement transformées ou vendues fraiches. La surverse des EUT au niveau des lagunes s'écoule dans le ruisseau la Garonne jusqu'à la mer, notamment l'hiver. La Figure 28 présente un résumé du système.



Figure 28 : Fonctionnement du système de Porquerolles (Cerema, 2024)

Les enjeux sur la ressource en eau sont très forts sur l'île de Porquerolles compte tenu de sa situation insulaire et de la pression touristique estivale. Cela nécessite une bonne adéquation entre les besoins (agricole, touristique, domestique) et les ressources disponibles. L'exploitation des ressources souterraines est limitée. Avec l'installation du conservatoire botanique et le développement des vergers de collection, la réutilisation des eaux usées traitées de la STEP est apparue comme une solution intéressante permettant de garantir une ressource suffisante. En effet, la période de haute saison touristique, et donc de production d'eau, correspond à celle des besoins en eau d'irrigation. Des

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

lagunes ont donc ensuite été installées pour garantir une qualité sanitaire suffisante. Elles assurent également une capacité de stockage de 6 800m^3 (Cerema, 2024)

Le PNPC souhaitait mobiliser notre démarche pour plusieurs raisons :

- Evaluer les risques actuels liés à l'exploitation des lagunes dont il a récemment pris la responsabilité ;
- Evaluer les risques liés à une évolution des productions vers le développement de cultures maraîchères ;
- Aborder la question du port des EPI avec son personnel ;
- Avoir un accompagnement sur l'élaboration du plan de gestion des risques et la mise en conformité vis-à-vis des évolutions réglementaires.

En résumé, le cas de Porquerolles est un cas d'étude intéressant pour nos travaux de recherche dont les objectifs sont assez similaires de ceux de Comme Clermont-Ferrand. Le PNPC sera considéré comme le « porteur de projet » pour ce cas d'étude.

2.3.1.2 Un projet en construction dans la Drôme (Auvergne-Rhône-Alpes)

Dans le cadre d'un projet de schéma territorial d'économie circulaire de l'eau mené notamment par l'association Biovallée, la REUT a été identifiée comme solution pour répondre à différents enjeux : amélioration de la qualité de la Drôme, respect du débit réservé, substitution aux prélèvements dans la rivière et sécurisation de l'irrigation en période d'interdiction des prélèvements (Leclercq, 2023). Plusieurs entités participent au projet, dont ECOFILAE et UR REVERSAAL – INRAE, ce qui a permis d'identifier ce cas d'étude.

Le projet est découpé en trois phases :

1. Evaluation des opportunités, définition d'un plan d'actions et études de faisabilité pour la mise en place de sites pilotes ;
2. Maîtrise d'œuvres de pilotes démonstrateurs ;
3. Réplication des démonstrateurs et déploiement à grande échelle.

Lors de notre rencontre avec les porteurs de projet (l'association Biovallée), le projet en était à la première phase. Plusieurs sites avaient été identifiés comme démonstrateurs et l'objectif était désormais d'analyser les configurations possibles selon plusieurs critères d'évaluation dont la faisabilité technique, réglementaire et financière et les risques et bénéfices sanitaires, environnementaux, agronomiques, sociaux et économiques.

Une des sites retenus pour l'utilisation de Multiware est celui de Crest dont la filière de traitement est une boues activée (19 000 EH) suivie d'un traitement UV fonctionnant de mai à octobre. Les volumes produits sont d'environ 2 000m^3/j (60 000 m^3/mois) pendant cette période. Les filières agricoles bénéficiaires sont variées : grandes cultures, semences, cultures maraichères, arboriculture…avec quelques filières emblématiques du territoire comme le noyer ou l'ail. Les exploitations maraichères se développent avec les modes de commercialisation en vente directe ou en circuits-courts, dynamisée notamment par les politiques de relocalisation de l'alimentation. La STEP est gérée par VEOLIA et le réseau d'irrigation par le Syndicat d'Irrigation Drômois (SIID). D'autres acteurs d'autres communes ont également participé comme la commune d'Allex à travers la participation de la Communauté de communes du Val de Drôme (CCVD).

L'outil a été proposé aux porteurs de projet afin de construire collectivement des scénarios de gestion envisageables selon les filières agricoles. A travers cette construction, l'objectif était de pouvoir

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

réfléchir à la gestion à mettre en place, aux usages possibles et pouvoir anticiper les exigences réglementaires et les intégrer dans les choix techniques. L'association Biovallée sera considérée comme le « porteur de projet » pour ce cas d'étude.

2.3.2 Une adaptation chemin-faisant de l'outil et de la méthodologie de mise en œuvre

Les deux autres cas d'étude sur lesquels l'outil a été mobilisé ont donc été présentés ainsi que les objectifs des porteurs de projet associés. Pour chacun des trois cas d'étude, un seul atelier de simulation participative avec l'outil a été réalisé. Pour rappel, dans le cas de Clermont-Ferrand, plusieurs options sont envisageables la mise en conformité : restrictions des usages, mise en place d'une unité de traitement supplémentaire ou mise en place de mesures barrières complémentaires. Les restrictions d'usage auraient des impacts sur les agriculteurs en particulier ceux nécessitant une qualité A. L'ajout d'une unité de traitement aurait des conséquences économiques qui pourraient se traduire par exemple par l'augmentation du prix du m^3 d'EUT pour les agriculteurs et interroge également les conséquences organisationnelles associées. La prise en compte des mesures barrières serait une alternative intéressante pour les porteurs de projet mais elle nécessite une discussion avec différents acteurs :

- les services instructeurs en charge du dossier pour prouver une gestion suffisante des risques par l'approche « multi-barrières » ;
- les agriculteurs qui pourraient alors être intégrés dans la gestion des risques jusque-là gérée entièrement par l'ASA ;
- les autres membres du comité de suivi par souci de transparence notamment vis-à-vis des communes vivants à proximité et des consommateurs.

Un accompagnement pour la réalisation du dossier de conformité et en particulier l'évaluation des risques était également attendu de la part des porteurs de projet. Si ces enjeux font écho à ceux de Porquerolles, quelques différences sont cependant observées. Les cultures nécessitant une qualité A ne sont pas encore d'actualité sur l'île contrairement à Clermont-Ferrand où des agriculteurs cultivent actuellement des carottes et des oignons. Pour Clermont-Ferrand, l'objectif était d'aborder les choix de gestion pour la mise en conformité, en particulier avec les services instructeurs qui valideront la demande d'autorisation. Dans le cas de Porquerolles, un des objectifs principaux était de pouvoir aborder la gestion des risques avec les acteurs opérationnels en particulier ceux en charge de l'exploitation des lagunes. Dans le cas de la Drôme, les objectifs étaient plutôt de pouvoir collectivement construire des scénarios prospectifs. Ainsi, des attentes opérationnelles sont associées à la méthodologie au-delà de nos objectifs de recherche concernant les apports de la construction collective de la gestion des risques. Néanmoins, le contexte des différents cas d'étude mais aussi les objectifs opérationnels associés n'étaient donc pas complètement similaires. Cela a amené une organisation différente de l'atelier concernant les participants sollicités, mais aussi une adaptation de certains paramètres de l'outil (cas fictif, rôles proposés…).

2.3.2.1 Une sélection des participants réfléchie avec les porteurs de projet

Le Tableau 25 présente un résumé des participants sélectionnés pour les trois ateliers.

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

		Cas existant n°1 CLERMONT (novembre 2023)	Projet en construction n°1 DROME (février 2024)	Cas existant n°2 PORQUEROLLES (mars 2024)
Joueurs				
Agriculteurs	*Maïs semence*	DDT-1	SMRD	MTPM-1 & Asdfv-1
	Pomme de terre	ARS-1	SUEZ & DDT-3	MTPM-2 & PNPC-1
	Carotte	Université de Clermont	Agriculteur-2 & 3CPS	PNPC-2 & PNPC-3
	Oignon	-	CCVD	VEOLIA & PNPC-4
	Noyer	-	DDT-4	-
	Pomme	-	-	PNPC-5
	Tomate	AE LB	ARS-2	Asdfv-2
	Salade	-	-	DDTM & Asdfv-3
Collectivité (STEP)		CAM	Agriculteur/SIID & Chambre d'agriculture-2	INRAE-2
Président de l'ASA		Agriculteur-1	Agriculteur-2 & 3CPS	DTTM & Asdfv-4
Habitants		Mairie de Saint Beauzire	-	-
Nombre total		**7**	**10**	**12**
Observateurs				
Porteurs de projet		ASA LN & SOMIVAL Ing.	BIOVALLEE-1 & 2	PNPC-6
Autres		DDT-2 & Chambre d'Agriculture-1& CEREMA-1 & FRANE	ECOFILAE-2 INRAE-3	Cerema-2
Nombre total		**7**	**4**	**2**
Participants (joueurs + observateurs)				
Nombre total		**14**	**14**	**14**
Animation				
Facilitateurs		INRAE-1	INRAE-1	INRAE-1
Aide à la facilitation		ECOFILAE-1	INRAE-2	INRAE-2

Légende : les nombres attribués devant certaines entités indiquent que différents participants ont été présents pour ces entités.

Tableau 25 Participants présents à l'atelier et distribution des rôles

Pour chacun des trois ateliers, les participants ont été choisis en concertation avec les porteurs de projet. L'objectif était de ne pas dépasser 15 participants pour chaque atelier. La répartition des participants en « joueurs », qui ont un rôle et participent à la simulation participative, et « observateurs », qui sont extérieurs à la simulation et qui analysent la session, sera expliquée plus en détail dans la prochaine section. Dans le cas de Clermont-Ferrand, la sélection des participants a été faite à partir de la liste du comité de suivi. Comme résumé dans le Tableau 22 (p.129), des participants qui avaient été impliqués dans le processus de co-construction de l'outil ont été sollicités. C'est le cas, par exemple, de la personne travaillant sur la station d'épuration gérée par la métropole (CAM). De nouvelles personnes ont été mobilisés comme un agriculteur faisant partie de l'ASA LN qui n'avait pas encore participé à un des temps de la co-construction (ARDI, visite terrain…). Les porteurs de projet ont sélectionné le participant en raison de la diversité des cultures qu'il pratique actuellement (grandes cultures comme le maïs semence et le blé, des légumes plein champ comme l'oignon et la pomme de terre…) mais aussi qu'il démarre (carottes, ail, échalote…). Il avait également été convenu que la personne choisie ne devait pas avoir déjà participé à la co-construction de l'outil afin de pleinement observer les effets de l'outil. En dehors de ceux faisant partie du bureau de l'ASA LN, les agriculteurs ne participent généralement pas aux réunions du comité de suivi. L'objectif était d'observer les apports associés à l'intégration de ces acteurs dans la construction collective et également leur réaction vis-à-vis de l'approche multi-barrières. D'autres acteurs ont également été sollicités comme l'UFC Que-Choisir mais ont décliné l'invitation bien que leur présence aurait été intéressante.

Dans le cas de Porquerolles, compte tenu des objectifs de sensibilisation des acteurs opérationnels vis-à-vis des risques, la majorité des participants était des agents techniques du PNPC et des membres de l'association ASDFV qui utilisent les EUT. La MTPM et VEOLIA ont été intégrés en tant que gestionnaires de la STEP et anciens gestionnaires des lagunes. La DDTM a également été sollicitée afin d'entamer les discussions concernant le plan de gestion des risques. Il a été décidé avec les porteurs de projet de ne pas intégrer l'ARS à ce stade du processus et qu'elle serait à associer pour un autre atelier.

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

Enfin, pour le cas de la Drôme, les participants ont été sélectionnés avec l'association Biovallée à partir de la liste du comité de pilotage qui rassemble un large ensemble d'acteurs.

Au final, les ateliers ont majoritairement été composé par des acteurs opérationnels en particulier pour les ateliers de Porquerolles et de la Drôme. Les acteurs post-récolte, par exemple, les distributeurs sont absents des trois ateliers bien qu'ils pourraient jouer un rôle clé si des mesures barrières devaient être mises en place à leur échelle. Néanmoins, il a été préféré de se baser sur des groupes déjà constitués par le biais des comités de suivi ou des comités de pilotage pour cette première utilisation de l'outil.

2.3.2.2 Une construction du cas fictif avec les porteurs de projet pour aborder le réel et envisager des possibilités

Le niveau de réalisme du modèle est élément important dans une simulation participative. En effet, « il est à la fois un reflet, une traduction et un medium pour interroger la réalité (Vinck, 2009 cité par Becu, 2020).

Concernant le cas de Clermont-Ferrand, une présentation de l'outil a été faite en comité restreint avec l'ASA LN, la SOMIVAL Ingénierie et des membres de l'ASA LN en octobre 2022 à la suite de la phase de modélisation participative réalisée pendant l'été. L'objectif était de discuter de la calibration de l'outil (cas fictif, paramètres d'exposition…) avec les porteurs de projet et identifier les modifications à effectuer avant la simulation avec le comité de suivi et notamment les services instructeurs. Nous leur avons proposé de travailler sur un cas fictif que nous avions construit de notre côté : maïs semence irrigué en rampe d'aspersion, pomme de terre irrigué par canon-enrouleur, pomme irriguée en micro-aspersion et tomate irriguée en goutte à goutte. Ce cas fictif permettait d'aborder des cultures actuelles mais aussi des perspectives futures. A l'issue de cet atelier, le cas fictif a été modifié à la demande des participants. Ainsi, la pomme a été remplacée par la carotte, une culture considérée comme plus « pertinente ». Elle est réalisée par certains membres et elle nécessite d'atteindre la qualité A. La filière « fictive » de traitement était une station d'épuration en boues activées gérée par la collectivité suivie de lagunes de maturation gérée par l'association des agriculteurs. Ce choix avait été fait afin d'aborder la situation réelle. Néanmoins, à l'issu de l'atelier en conditions réelles, les lagunes ont été supprimées du cas fictif. Ce choix a été fait pour plusieurs raisons. Tout d'abord, l'objectif était de permettre aux joueurs d'explorer différentes possibilités concernant les procédés de traitement avancés. De plus, la présence des lagunes de maturation dans le cas fictif utilisé à Clermont-Ferrand a limité la mise de côté du cas réel, comme nous le verrons dans le chapitre 3.

Un atelier « test » de l'outil en comité restreint a également été réalisé sur le cas de la Drôme. Il a été organisé en juillet 2023 dans les locaux de l'association Biovallée situés sur l'Ecosite du Val-de-Drôme. L'objectif était de réaliser, en comité réduit, une session de test de l'outil tel qu'il avait utilisé à Clermont-Ferrand afin de i) vérifier avec les porteurs de projet la pertinence de son utilisation ii) identifier les paramètres à adapter et iii) identifier les personnes à intégrer au groupe pour la simulation collective. Les participants ont été choisis en concertation avec des acteurs du bureau d'étude ECOFILAE et d'INRAE qui sont impliqués dans le projet. Les retours recueillis pendant le débriefing ont confirmé d'utiliser l'outil sur ce cas d'étude en particulier pour identifier les contraintes sanitaires liées aux différentes cultures. Il a été souligné que des adaptations devaient être apportées en ce qui concerne les cultures du cas fictif ainsi que certains coûts. Les participants ont alors indiqué des acteurs clés pour consolider ces paramètres, qui ont été rencontrés lors d'entretiens individuels en septembre 2023. L'atelier avec l'ensemble des parties prenantes a ensuite été réalisé en février 2024, également sur l'Ecosite du Val-de-Drôme. D'autres cultures ont été ajoutées au cas fictif comme le noyer et l'oignon qui sont des cultures emblématiques de la Drôme. Elles permettaient également d'aborder d'autres éléments de la gestion des risques comme les mesures post-récolte (séchage des

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

oignons) ou la contribution de l'irrigation sous frondaison. Les participants aux différents temps d'adaptation de l'outil sont présentés Annexe 7.

Pour le cas de Porquerolles, un seul atelier a été réalisé. L'objectif était principalement d'amorcer la discussion sur le plan de gestion des risques et de sensibiliser le personnel technique du PNPC en charge des lagunes et les membres de l'association ASDFV qui utilisent les EUT. Il n'a pas été nécessaire de vérifier la pertinence de l'outil. Le cas fictif et l'organisation de l'atelier ont été construits lors d'une réunion en visioconférence en amont de l'atelier avec une responsable du PNPC. Par exemple, la pomme a été préférée au noyer car elle est plus représentative pour le cas de Porquerolles. La salade a également été intégrée compte tenu des éventuelles évolutions vers du maraîchage. C'était également intéressant d'intégrer cette culture qui est fréquemment utilisée dans l'évaluation des risques pour représenter les scénarios *les plus défavorables*.

2.3.2.3 Une distribution des rôles pour encourager la construction collective

Concernant les rôles proposés, le rôle des habitants a été supprimé à la suite de l'atelier de Clermont-Ferrand. L'objectif était d'encourager une vision systémique du système et de montrer leur contribution dans la gestion des risques. Cependant, le pouvoir d'action s'est avéré trop limité par rapport aux autres joueurs. Le rôle de la collectivité avait été maintenu pour l'atelier mené dans la Drôme. Bien que sa présence soit intéressante pour la construction du scénario « traitement », son pouvoir d'action au scénario « multi-barrières » était plus limité. Ce rôle a finalement été incarné par un des animateurs pour l'atelier de Porquerolles. A Clermont-Ferrand, le rôle de l'ASA était un rôle à part entière : gestion des lagunes et du réseau de distribution et accompagnement des membres de l'ASA. Le participant ayant interprété ce rôle a également ressenti une impression de retrait et des capacités d'actions limitées. Il a donc été intégré par la suite comme la caractéristique d'un des joueurs « agriculteurs ». Les participants ont été répartis entre deux catégories : i) les « *joueurs* » qui se sont vu attribuer un rôle et ont réalisé la simulation participative et ii) les « *non-joueurs* » qui comprenaient les porteurs de projet et d'autres parties prenantes qui ont observé la session ou aidé à la facilitation. Dans les trois cas, les porteurs de projet étaient observateurs afin qu'ils puissent se concentrer sur les échanges entre les différentes parties prenantes. Pour les autres participants, la répartition des rôles a varié selon les ateliers.

Ainsi, dans le cas de Clermont-Ferrand, il avait été défini que chaque rôle était interprété par un seul participant. Le nombres de rôles étant limité à sept, des participants ont donc observé la session. Ce rôle d'observateur a été attribué soit aux acteurs ayant une implication moins directe par rapport aux enjeux de l'atelier comme l'association environnementale soit aux acteurs dont l'entité était déjà représentée parmi les joueurs. C'est le cas par exemple de la DDT où deux personnes étaient présentes. Concernant la répartition des rôles pour les joueurs, certains participants se sont vu attribuer un rôle proche de celui qu'ils occupent dans la réalité. C'est le cas par exemple de la personne de la CAM qui s'est vu attribuer le rôle de la collectivité. *A posteriori,* ce choix semble négliger certains intérêts démontrés du jeu de rôles comme le fait de se mettre à la place de l'autre et envisager de nouvelles possibilités. Ce choix avait néanmoins été fait à la suite des résultats des différentes sessions « *test* » de l'outil qui avaient montré certaines limites dans les échanges lorsque des participants occupaient ce rôle. De plus, mobiliser les participants sur une journée entière étant difficile, l'atelier avait été limité à une demi-journée. Il avait donc été ambitionné d'aborder un maximum des questionnements liés à la mise en conformité sur ce temps restreint. En plaçant certains participants dans leur rôle réel, il avait été attendu que les échanges soient plus « réalistes » et que cela faciliterait certains échanges et la construction du scénario. Néanmoins, cette configuration a montré un certain nombre de limites que nous aborderons dans le chapitre 3. Elle n'a donc pas été reproduite pour les ateliers de la Drôme et de Porquerolles.

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

Dans le cas de la Drôme et Porquerolles, les joueurs étaient plus nombreux et répartis en binôme. Lorsque le nombre de participants le permettait, des binômes ont été organisés en associant les acteurs d'entités différentes. L'objectif était de pouvoir faire participer plus de participants à la simulation et encourager la collaboration entre les entités. Les rôles ont été attribués de manière aléatoire entre les binômes.

Comme nous l'avons déjà mentionné, d'autres paramètres ont également varié en fonction de l'avancée des recherches bibliographiques ainsi que des évolutions réglementaires avec notamment la parution de l'AF du 18/12/2023. Avant de présenter les résultats obtenus lors des ateliers, nous allons conclure ce chapitre par la présentation du protocole de suivi-évaluation que nous avons mis en place pour tenter de répondre à notre problématique.

2.3.3 La mise en place d'un protocole de suivi pour identifier les apports de la construction collective

2.3.3.1 Problématique de recherche et hypothèses associées

Les deux premiers chapitres ont permis de présenter un ensemble d'éléments associés à la gestion des risques : encadrement normatif, approches de gestion envisageables mais aussi état des connaissances scientifiques sur les risques, leur évaluation et les mesures de gestion. Différents enjeux ont été identifiés pour la gestion des risques microbiologiques associés notamment à l'approche de gestion « actuelle » basée principalement sur l'ajout de procédés de traitement. Ces enjeux sont économiques compte tenu des coûts d'investissement et opérationnels associés à ces procédés mais aussi environnementaux. En effet, les services d'eau et d'assainissement ont des impacts environnementaux non-négligeables comme par exemple l'émission de gaz à effets de serre (GES) (de Boer *et al.,* 2022 ; Alix *et al.,* 2022). Le 6ème rapport du GIEC souligne l'importance de réduire massivement les émissions de dioxyde de carbone et d'autres GES et de respecter *l'accord de Paris sur le climat* signé en 2015 (Ipcc, 2023). Néanmoins, les exigences de qualité requises se renforcent, en particulier pour les cultures vivrières consommées crues. Ce renforcement nécessite le recours à des procédés de traitement supplémentaire. Une possibilité serait de restreindre les usages agricoles en fonction de la qualité atteinte. Cela soulève toutefois des interrogations sur les impacts sociaux associés à ces restrictions. En effet, les agriculteurs produisant ces cultures ne pourraient avoir accès aux EUT et leur activité pourrait alors en être impactée. C'est donc un impact social à l'échelle des agriculteurs mais également à l'échelle collective puisque la production de cultures vivrières consommées crues contribue à la souveraineté alimentaire.

Nous avons vu qu'une autre approche est envisagée dans le cadre réglementaire : l'approche *multi-barrières.* Cette approche propose d'évaluer les risques à partir de la dose d'exposition et non uniquement de la concentration dans les eaux réutilisées. Elle propose également de gérer les risques sur l'ensemble de la filière de REUT à travers les pratiques culturales mises en place et les équipements mobilisés et non uniquement par la mise en place de procédés de traitement avancé. Un plus large ensemble d'acteurs est mobilisé dans la gestion des risques et notamment les agriculteurs. Au-delà de leur mobilisation pour la gestion, la littérature indique l'importance de les mobiliser dans la construction des choix de gestion. L'approche *multi-barrières* nécessite donc une organisation collective pour la construction (choix des mesures, partage des responsabilités…) et sa mise en œuvre (surveillance…) qui suscitent des interrogations. Néanmoins, selon l'OMS, cette approche permet de s'affranchir des contraintes associées aux procédés de traitement avancé. Ainsi, un enjeu englobe ces différents éléments et dessine celui de la thèse : la nécessité d'une construction collective de la gestion des risques microbiologiques pour répondre aux enjeux actuels associés à la gestion des risques (économiques, environnementaux, techniques ou encore organisationnels). Par « collective », nous

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

entendons ici la définition donnée par le Larousse « *qui est le fait de plusieurs personnes* ». Ainsi, nous tenterons dans cette thèse de répondre à la problématique suivante :

Quels seraient les apports d'une construction collective de la gestion des risques microbiologiques pour des filières de REUT durables ?

Comme indiqué en introduction, par « durable » nous entendons des filières de REUT qui soient « à la fois écologiquement viable, économiquement efficace et socialement équitable » (Harding, 1998 cité par Barnaud, 2008).

Cette problématique repose sur plusieurs sous-questions de recherche : quels sont les apports de l'évaluation des risques par la dose d'exposition pour la gestion des risques ? quels sont les apports d'une gestion par *barrières* pour la gestion des risques ? comment accompagner cette construction collective ?

Plusieurs hypothèses se dessinent :

- La construction collective impliquant **les différentes parties prenantes** contribue à construire une **gestion systémique et intégrée des risques,** c'est-à-dire sur l'ensemble de la filière, et impliquant les différents acteurs concernés et également **adaptée** aux spécificités du terrain.
- L'approche ***multi-barrières*** contribue à cette gestion **systémique et intégrée** en encourageant l'évaluation des risques par la **dose d'exposition** et la mise en place de **mesures *barrières*** *;*
- Une approche systémique et intégrée des risques contribue à **l'affranchissement des contraintes associées aux procédés de traitement supplémentaire** et à la construction de filières de REUT durables.

Pour accompagner la construction collective des risques, nous avons choisi comme méthodologie la mobilisation des approches participatives, et notamment la simulation participative. Un outil a été construit et trois terrains d'étude ont été identifiés. L'objectif est donc de mettre en place un protocole de suivi-évaluation pour évaluer les résultats obtenus au regard de notre question de recherche.

2.3.3.2 Construction d'un protocole de suivi-évaluation

Pour tenter de répondre à nos hypothèses, nous avons évalué les résultats produits par la construction collective de la gestion des risques. L'analyse s'est concentrée sur les trois ateliers de simulation participative réalisés en condition « réelle », c'est-à-dire i) avec le comité de suivi de Clermont-Ferrand, ii) avec les acteurs de Porquerolles et iii) lors du deuxième atelier de la Drôme rassemblant le comité de pilotage. Les effets associés à la participation au processus de modélisation participative ainsi qu'aux différentes phases de test de l'outil n'ont pas été évalués. Bien que ces éléments auraient été intéressants, nous avons choisi de nous concentrer sur les contributions associées à la construction collective des scénarios pendant les ateliers.

Différentes productions sont attendues à l'issu de chacun des ateliers :

- Une évaluation collective des risques et donc la production de scénarios d'exposition ;
- Au moins deux scénarios de gestion correspondant à chacune des approches envisagées par la réglementation.

Ces productions vont donc être évaluées au regard de notre problématique et des hypothèses de recherche présentées précédemment.

Au niveau des participants, différents « effets » produits par la simulation participative sont attendus. L'effet est défini comme « *ce que les participants retirent de l'expérience de simulation* » (Becu, 2020).

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

Les effets peuvent être étudiés sous différentes formes. Becu en propose trois principales : les effets d'apprentissage, les effets de de médiation à partir de l'objet-frontière et les effets d'expérimentation du changement (Becu, 2020). Compte tenu du faible nombre d'ateliers évalués et d'une évaluation menée sur un temps assez restreint, nous nous intéresserons principalement aux effets d'apprentissage.

Becu propose une classification des effets d'apprentissage appliquée à la simulation participative :

Catégorie d'apprentissage	Acquisition de connaissances et de compétences (capacités) associées à la catégorie d'apprentissage
Cognitif	Connaissance sur le système d'interactions (concepts, incidences des mécanismes d'interactions, hétérogénéité des situations) Capacité à savoir identifier l'information dans un système complexe, la traiter et la mobiliser en situation de décision
Relationnel	Connaissance du point de vue, du rôle et des positions des autres Capacité à adapter son comportement et son attitude (maîtrise émotionnelle) en fonction des attentes et des positions des autres
Collaboratif	Connaissance des interdépendances entre acteurs et des aptitudes des autres Capacité d'écoute, de partage d'informations et de points de vue, d'empathie. Capacité à faire confiance à autrui, à se coordonner et à organiser des actions collectives
Politique	Connaissance des instruments (moyens d'action et d'observation), et des intérêts et ressources des parties prenantes Capacité à négocier, à défendre son opinion, à construire des accords collectifs, à chercher des solutions alternatives répondant à l'intérêt général

Tableau 26 : Classification des effets d'apprentissage de la simulation participative (adapté de Becu, 2020)

Les apprentissages cognitifs regroupent, par exemple, les connaissances générales ou techniques associée à la problématique. Concernant les apprentissages relationnels, cela concerne le rapport aux autres participants et les connaissances les concernant (point de vue, rôle, valeurs, positions…).. Les apprentissages collaboratifs sont un ensemble de compétences communicationnelles et collaboratives entre les participants qui visent à améliorer le travail collectif. La quatrième et dernière catégorie concerne les apprentissages politiques qui permettent aux acteurs de mieux connaître les instruments d'action, les intérêts de chacun et développer des capacités pour se positionner de manière stratégique dans l'action et les décisions collectives (Monfort, 2023).

En résumé, l'objectif est donc d'observer les effets d'apprentissage permis par la construction collective et également évaluer les productions obtenues à travers le processus de construction des scénarios. Quatre catégories ont été définies :

- « **Risques** » : données relatives aux risques sanitaires liés à la REUT telles que les résultats de l'identification collective des risques, les perceptions des participants et leur évolution ou encore les connaissances apportées sur les risques … ;
- « **Mesures de gestion** » : données relatives aux mesures de protection envisageables pour gérer les risques (solutions de traitement, barrières post-traitement…) telles que les mesures retenues par les participants, les informations apportées… ;
- « **Réglementation** » : données relatives au cadre réglementaire et aux différentes approches de gestion telles que les connaissances des participants, la perception des participants sur ces différentes approches ;
- « **Autres parties prenantes** » : données relatives aux relations entre les différents acteurs du système de REUT telles que la discussion collective, la création de liens, la perception des autres….

Différentes méthodes ont été mobilisées pour recueillir les données et explorer notre question de recherche. Nous avons choisi d'utiliser des méthodes qualitatives et quantitatives. L'utilisation conjointe de ces méthodes permet de bénéficier des intérêts de chacune. Ainsi, nous avons mobilisé

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

plusieurs méthodes qui ont varié selon les ateliers : 1) des entretiens semi-directifs avec les participants de Clermont-Ferrand, 2) des questionnaires pour les participants de la Drôme et de Porquerolles et 3) une observation du déroulement des ateliers grâce à un enregistrement audio des échanges pendant les sessions (Figure 29).

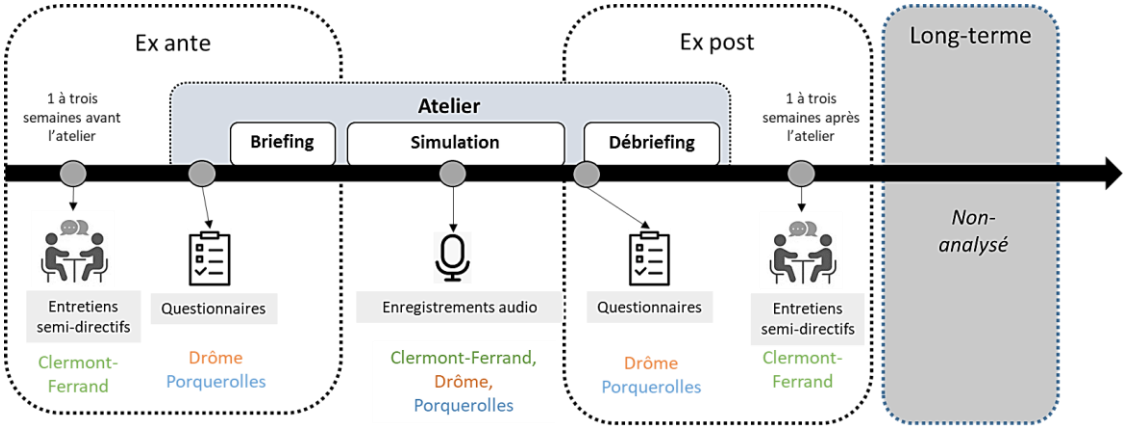


Figure 29 : Méthodes mobilisées pour le suivi-évaluation des trois ateliers

Ces méthodes ont été mises en œuvre à différents moments : quelques semaines avant l'atelier et après les ateliers ainsi que pendant les ateliers. Le temps restreint de la thèse n'a pas permis d'évaluer les effets sur le long-terme n'ont pas été évalués (changement de comportement, prise de décision…).

Pour l'atelier de Clermont-Ferrand, nous avons choisi de réaliser des entretiens avec les participants. Cette méthode est intéressante pour recueillir des données sur les opinions, les connaissances mais aussi les attentes et les perceptions. Les entretiens *ex ante* et *ex post* ont été organisés en quatre parties suivant les catégories que nous avons mentionnées précédemment : 1) REUT, 2) Risques sanitaires, 3) Gestion des risques et 4) Réglementation. L'objectif était de recueillir les perceptions des participants concernant ces différentes catégories mais aussi les connaissances, les attentes ou encore les besoins. Ces entretiens ont été réalisés avec des joueurs et également avec trois participants « non-joueurs » qui occupaient le rôle d'observateur pendant la session. Pour deux joueurs, les entretiens n'ont néanmoins pas pu être réalisés. En effet, une personne de la DDT et le représentant d'une des communes situées à proximité des périmètres irrigués ont été ajoutés au groupe des participants quelques jours avant l'atelier. Cela n'a pas laissé suffisamment de temps pour réaliser les entretiens avant l'atelier. L'entretien *ex post* n'a également pas été réalisé puisqu'il n'était pas possible de comparer avec la situation antérieure.

Compte tenu du nombre de participants plus importants pour les ateliers de la Drôme et de Porquerolles, il a été choisi de mobiliser les questionnaires. En effet, les entretiens sont une méthode qui demande plus de temps dans la mise en œuvre mais aussi dans le traitement que les questionnaires. Les questionnaires ont été réalisés uniquement avec les joueurs et sont présentés en Annexe 8 et Annexe 9.

Les données qualitatives (*verbatims* identifiées pendant les entretiens et l'atelier, réponses aux questionnaires) ont été traitées manuellement en identifiant les données associées à l'apprentissage cognitif, au changement de perception et à l'effet émotionnel. Les données quantitatives ont été traitées grâce au logiciel *Excel.* Les données concernant les modalités d'organisation des différents ateliers (format, nombre de participants, durée des ateliers, distribution des rôles) ont également été collectées afin d'évaluer la démarche en elle-même.

Initialement, des fiches de suivi avaient été construites pour accompagner les participants en charge de l'observation de la session (porteurs de projet, participants non-joueurs …). Néanmoins, ces fiches n'ont pas été mobilisées par les observateurs. Nous pouvons expliquer ce constat par le fait que ces

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

personnes n'étaient pas formées à l'observation et nous reconnaissons que les fiches de suivi proposées aux observateurs n'étaient pas assez claires et précises pour faciliter la compréhension de ce rôle pourtant important. De plus, les observateurs ont indiqué une difficulté pour se concentrer sur l'observation d'un outil qu'ils découvraient et qui suscitaient leur intérêt. Les enregistrements audio ont toutefois permis de réaliser une analyse des sessions.

2.4 Conclusion du chapitre 2 : la production d'un outil de simulation participative

L'objectif de ce deuxième chapitre était de transférer le modèle d'évaluation et de gestion des risques construit dans le chapitre 1. L'état de l'art nous a permis de mettre en évidence un besoin de partage des connaissances, des représentations, des attentes et des besoins entre les différentes parties prenantes pour construire la gestion des risques microbiologiques. Les décisions peuvent néanmoins s'avérer complexe compte tenu de ce vaste ensemble d'acteurs à impliquer, aux attentes différentes mais aussi aux perceptions hétérogènes sur les risques et leur gestion. De plus, nous avons mis en lumière une certaine absence de méthodologie pour accompagner cette construction collective. Grâce à un processus de modélisation d'accompagnement, un outil de simulation participative a été co-construit avec une partie des acteurs du cas de Clermont-Ferrand. Ce cas emblématique de la REUT agricole doit se mettre en conformité vis-à-vis des récents changements réglementaires. Les choix de gestion associée à cette mise en conformité doivent être discutés avec les différents acteurs du comité de suivi en particulier dans le cas de la mise en place d'une approche *multi-barrières.* Un outil de simulation participative sous forme d'un jeu de rôle a donc été co-construit. Cet outil permet aux joueurs de construire collectivement deux scénarios de gestion correspondant aux deux approches de gestion envisagés par la réglementation. Les processus de construction de ces deux scénarios mobilisent différents supports dont un modèle informatique permettant de réaliser la simulation des coûts et de mobiliser la QMRA pour évaluer les risques et la contribution des choix de gestion. Au-delà du cas de Clermont-Ferrand, deux autres cas d'étude ont été identifiés pour utiliser l'outil et évaluer les apports d'une construction collective de la gestion des risques microbiologiques : le cas de Porquerolles et un projet en construction dans la Drôme. Un protocole de suivi-évaluation a été construit pour évaluer les productions obtenues, les effets sur les participants et tenter de répondre à notre problématique de recherche. Les résultats obtenus sont le sujet notre prochain et dernier chapitre.

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

3 Chapitre 3 - La construction collective de scénarios de gestion des risques microbiologiques pour la REUT agricole

Après avoir construit un outil de simulation participative intégrant un modèle d'évaluation et de gestion des risques qui permet aux acteurs de créer, tester et simuler collectivement des scénarios de gestion de risques, il s'agit désormais de l'utiliser sur les trois cas d'étude identifiés. L'objectif est de tenter de répondre à notre question de recherche qui porte sur les apports d'une construction collective de la gestion des risques microbiologiques pour des filières de REUT durables.

Pour rappel, la simulation était organisée en deux tours, correspondant chacun à une des approches envisagées par la réglementation. L'objectif pour les joueurs était donc de produire, *a minima,* au moins un scénario pour chaque approche :

- Un scénario « *approche conventionnelle* » où les objectifs de qualité exigés doivent être atteints pour chaque joueur (tour n°1) ;
- Un scénario « *approche multi-barrières* » où l'objectif de santé fixé par l'OMS ($\leq 10^{-6}$ DALYs par personne et par an) doit être atteint pour l'ensemble des populations potentiellement exposées (tour n°2).

Le scénario *multi-barrières* est construit en plusieurs étapes : identification collective des risques (scénarios d'exposition) (étape 1), identification des mesures *barrières* existantes et évaluation des risques (étape 2) et mise en place de nouvelles mesures si les objectifs de santé ne sont pas atteints (étape 3).

Dans une première partie, nous verrons que la construction du premier scénario a mis en lumière différentes limites associées à une gestion des risques uniquement basée sur l'atteinte d'une qualité grâce à la mise en place de procédés de traitement. Dans une deuxième partie, nous montrerons qu'un certain nombre de mesures *barrières* sont déjà mises en place à travers les équipements utilisés et les pratiques culturales et d'irrigation. Nous verrons que la construction collective a permis de produire un certain nombre d'informations sur les mesures *barrières* et également des questionnements. Dans une troisième partie, nous nous intéresserons à l'identification collective des risques, nécessaire à la construction du scénario 2. Cette identification collective a montré l'intérêt d'un partage et d'une confrontation des représentations, parfois hétérogènes, sur les risques. Nous analyserons également la contribution du modèle d'évaluation quantitative des risques (QMRA). Nous verrons que ces éléments contribuent à mettre en lumière l'intérêt d'évaluer les risques par la dose d'exposition plutôt qu'uniquement par la qualité de l'eau et contribuent également à accompagner la construction de gestion. Néanmoins, des interrogations ont été soulevées sur l'objectivité des résultats et la complexité de la méthodologie. Nous terminerons par une dernière partie consacrée à l'outil de simulation participative et notamment au format du dispositif pour accompagner la construction collective. Nous verrons que le format du jeu de rôles est un format original qui contribue au partage d'informations et de représentations et à la collaboration entre les parties prenantes. Néanmoins, d'autres ateliers sont nécessaires pour continuer les discussions suscitées et assurer la production de décisions partagées qui seront ensuite appliquées.

Pour l'ensemble des trois ateliers, les discussions suscitées par la construction du scénario « traitement » (tour 1) mais aussi l'identification des populations exposées et des voies d'exposition (tour 2 – étape 1) ont laissé un temps assez limité pour la construction du scénario « multi-barrières » ainsi que pour le débriefing. Concernant le scénario « multi-barrières », il est assez certain que cela a

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

limité les joueurs dans l'exploration et l'appropriation des mesures *barrières*. De plus, le débriefing s'est déroulé dans un temps très restreint (≤ 15 minutes) contrairement à ce qui avait été envisagé initialement. Or le débriefing est un temps clé de la simulation puisque les participants « *échanges ensemble sur l'expérience vécue durant la simulation pour en tirer des enseignements* » (Becu, 2020). Certains chercheurs considèrent que l'apprentissage commence avec le débriefing (Crookall, 2010). Ainsi, l'absence d'un réel débriefing a sûrement limité les participants dans leur processus d'apprentissage et dans l'expression des questionnements qui persistent après la simulation. Il est également important d'avoir en tête que, pour les ateliers de Porquerolles et de la Drôme, les questionnaires *ex post* ont été distribués avant le débriefing. Les réponses ont donc été formulées « à chaud » par les participants sans en avoir discuté collectivement. Nous reviendrons sur ces éléments tout au long de ce chapitre.

Les résultats sont illustrés par des *verbatims* qui sont accompagnées d'une indication des participants dont elles proviennent. Chaque indication est constituée de trois éléments : *1) le rôle occupé par le participant, 2) l'entité représentée par le participant et 3) l'atelier auquel le participant a pris part.* Les ateliers ont été abrégés : CF = Clermont-Ferrand, PQ = Porquerolles et DR = Drôme. Avant de présenter les résultats, il nous semble également important de préciser que l'avis individuel exprimé par un participant ne reflète pas nécessairement le positionnement de l'entité qu'il représente.

3.1 Une mise en lumière des limites d'une gestion basée sur l'ajout de procédés de traitement supplémentaire

Dans le chapitre 1, nous avons vu que l'approche de gestion qui consiste à définir différentes qualités selon les usages (cultures irriguées, systèmes d'irrigation utilisés…) est une des approches de gestion les plus retrouvées dans les cadres réglementaires. La mise en place d'un ou plusieurs procédés de traitement est généralement nécessaire pour atteindre le niveau de qualité exigé. Nous avons montré que la littérature interpelle sur les contraintes associées à ces procédés : contraintes techniques, impacts économiques importants… Dans cette partie, nous allons voir que le processus de construction collective du premier scénario a mis en lumière un certain nombre de ces limites et les conséquences qu'elles pourraient avoir en particulier sur les usages agricoles et notamment les cultures vivrières alimentaires qui nécessitent la qualité A.

Pour construire le premier scénario, les joueurs ont donc d'abord identifié i) la qualité requise pour chaque joueur et ii) la qualité atteinte par la filière de traitement en place au niveau de la station d'épuration. Pour l'atelier de Clermont-Ferrand, la filière de traitement en place comprend une station d'épuration (boues activées), gérée par la collectivité, et un traitement complémentaire (lagunes de maturation), géré par l'association des agriculteurs. Cette filière permet d'atteindre une qualité B (≤ 100 *E.coli* UFC/100mL). Pour les ateliers de Porquerolles et de la Drôme, les lagunes de maturation sont absentes. La station d'épuration (également en boues activées) permet d'atteindre la qualité D (≤ 10 000 *E.coli* UFC/100mL). Le Tableau 27 présente un résumé des qualités requises pour chaque joueur, leur positionnement sur le réseau de distribution collectif et s'ils peuvent se satisfaire de la qualité atteinte par la filière de traitement en place. Le positionnement sur le réseau de distribution a été précisé car nous verrons par la suite que c'est une facteur d'influence dans la construction de ce scénario.

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

Rôle	Clermont-Ferrand		Drôme		Porquerolles	
Maïs semence + Rampe d'aspersion	D	N°1	D	N°1	D	N°1
Pomme de terre + Canon sur enrouleur	B	N°3	B	N°4	B	N°3
Carotte + Micro-aspersion	A	N°2	A	N°6	A	N°4
Oignon + Micro-aspersion			A	N°5	A	N°5
Noix + Micro-aspersion			A(1)	N°3		
Pomme + Micro-aspersion					A(1)	N°7
Tomate + Goutte à goutte surface	C	N°4	B	N°2	B	N°6
Salade + Micro-aspersion					A	N°2

Légende : (1) : irrigation pendant la période la floraison à la cueillette ; en vert = usage autorisé avec la qualité atteinte en sortie de STEP, en rouge = usage non autorisé avec la qualité atteinte en sortie de STEP

Tableau 27 : Exigences de qualité requises et positionnement sur le rôle de distribution pour chaque rôle attribués pour les trois ateliers (Scénario 1)

Pour l'atelier de Clermont-Ferrand, la qualité atteinte en sortie de la filière de traitement est donc conforme pour trois joueurs sur quatre, soit la majorité. La situation est inversée par rapport à l'atelier de Clermont-Ferrand : la qualité requise était atteinte uniquement pour un seul joueur. Même si ce point n'a pas été abordé lors des ateliers, nous reconnaissons que l'atteinte d'une qualité D en sortie de traitement secondaire est discutable. Cependant, l'objectif était que la qualité soit atteinte pour au moins un des joueurs. Comme indiqué dans le chapitre 1 lors de la présentation du modèle d'évaluation (section 1.2.3.1), la concentration initiale en *E.coli* considérée dans notre modèle est de 10^6 *E.coli* UFC/100mL. Une concentration se situant dans les fourchettes indiquées par l'OMS. De plus, nous avons supposé que la filière de traitement fonctionne de manière optimale et permet d'atteindre la valeur maximale de la réduction log attribuée pour les différents procédés.

Comme la qualité n'est pas atteinte pour l'ensemble des joueurs, une discussion collective est alors entamée pour définir la gestion à mettre en place : restreindre les usages à la qualité atteinte, ajout d'un ou plusieurs procédés de traitement… Plusieurs combinaisons de procédés de traitement supplémentaires sont proposées aux joueurs à travers les supports de l'outil : cartes *barrières*, livret informatif … (voir Chapitre 2). Les combinaisons de traitement proposées ainsi que les informations à disposition des joueurs ont parfois varié entre les ateliers. Ainsi, une fiche décrivant les procédés de traitement a été mise à disposition des joueurs pour les ateliers de Porquerolles et de la Drôme contrairement à l'atelier de Clermont-Ferrand. Ces informations ont pu éventuellement orienter les discussions et influencer le choix des mesures entre les différents ateliers. Néanmoins, la construction du scénario a suscité un ensemble de questionnements et de réflexions néanmoins assez similaires entre les ateliers. Nous avons donc choisi de présenter les résultats des trois ateliers simultanément. Les résultats ont été rassemblés sous des « thématiques » de réflexion qui ont été abordées pendant les ateliers. L'ordre chronologique des discussions n'est pas nécessairement respecté.

3.1.1 Un choix à l'échelle collective pour permettre une flexibilité dans les assolements mais dont les coûts suscitent des réactions d'opposition

Pour l'atelier de Clermont-Ferrand, un seul joueur sur les quatre devait atteindre la qualité A. Néanmoins, comme indiqué par différents joueurs, les assolements sont amenés à varier : demande du marché, envies des agriculteurs (*rôle « ASA », participant membre de l'ASA LN, CF*), incitations nationales comme les PAT (*rôle « agriculteur - tomate » participant de l'AE LB, CF)…* D'autres joueurs pourraient donc également avoir besoin de cette qualité A dans les années suivantes. La mise en place d'une unité de traitement avancé à l'échelle collective serait alors intéressante. Elle permettrait d'atteindre la qualité la plus élevée (A) et, ainsi, d'assurer une flexibilité dans les pratiques futures :

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

[Tour 1] *« Est ce qu'on fige la qualité par les coûts ou par nos pratiques agricoles ? est-ce qu'on prend cette décision-là ? la première solution ou est-ce qu'on peut garder une liberté sur nos futures pratiques ? « (rôle « agriculteur – pomme de terre », participant membre de l'ARS, CF)*

Néanmoins, certains systèmes sont plus figés que d'autres dans les assolements et n'auront pas nécessairement besoin d'une qualité A (*rôle « ASA », participant membre de l'ASA LN*, *CF)*. C'est le cas, par exemple, du joueur cultivant du maïs semence. De plus, les évolutions des assolements pourraient ne pas conduire systématiquement vers des cultures exigeant une qualité A, mais peut-être vers des qualités B ou C :

[Tour 1] *« c'est bien d'avoir quelque chose qui est très souple mais tout ça, cela a des coûts. Si lui (ndlr : en mentionnant le joueur cultivant du maïs semence) il vient à traiter beaucoup plus fort, ses coûts explosent et si demain tous les récoltants disent « bon moi finalement je fais que du plus bas niveau », on va avoir une eau extrêmement bonne pour une utilité pas utile et un coût très élevé (…) là tu prends le cas où tu vas sur une culture plus exigeante mais tu peux aussi avoir le cas où tu vas dans une culture moins exigeante » (rôle « collectivité », participant de la CAM, CF)*

Au final, est-il donc vraiment pertinent d'atteindre cette qualité A si les volumes demandés par les agriculteurs ne correspondent pas aux volumes traités ? Ne serait-il donc pas préférable de figer la qualité à une classe « rentable » (B ou C par exemple) et de restreindre les pratiques agricoles à des cultures pouvant se satisfaire de ces qualités ?

[Tour 1] *« Il y a peut-être une qualité économiquement intéressante à rendre et que les gens qui adhèrent savent qu'ils peuvent peut-être se limiter en agriculture sur certains sujets parce que la qualité bloque » (rôle « collectivité », participant de la CAM, CF)*

Au final, la mise en place de ces restrictions sur les usages a été mise de côté par les joueurs de Clermont-Ferrand, qui ont plutôt envisagé une solution collective.

Pour les ateliers de la Drôme et de Porquerolles, les restrictions sur les usages n'ont pas été abordées. Dès le début, les joueurs ont envisagé la mise en place d'une filière de traitement supplémentaire à l'échelle collective. Ce résultat peut être associé au fait que la qualité A était nécessaire pour la majorité des joueurs et que la qualité actuellement atteinte ne correspondait qu'aux exigences d'un seul joueur.

Pour les trois ateliers, si au premier abord, la majorité des joueurs envisageait la mise en place d'une solution à l'échelle collective pour atteindre la qualité A, nous allons voir que la simulation des coûts associés a néanmoins entraîné l'opposition de certains joueurs.

- **Une filière de traitement réfléchie par rapport à différents critères : conditions opérationnelles, coûts économiques, réalité des participants …**

Le processus de construction collective a permis aux joueurs de discuter les différentes combinaisons de traitement proposées par l'outil à travers différents critères : réduction log atteinte, coûts associés, description technique …

Dans le cas de la Drôme, une filière « Filtre à sable + UV » à l'échelle collective a été envisagée. Les coûts associés à cette filière ont été un critère décisif pour les joueurs au-delà la qualité à atteindre. En effet, parmi les combinaisons proposées, cette solution est la moins chère pour atteindre la qualité A. Compte tenu de son effet rémanent, l'ajout d'une unité de chloration a également été jugé nécessaire par un des joueurs institutionnels pour assurer le maintien de la qualité après la filière de traitement (*rôle « agriculteur – tomate », participant de l'ARS n°2, DR*). Un autre joueur institutionnel

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

a également rejoint cette proposition en soulignant la nécessaire de prendre en considération une éventuelle fluctuation de la qualité après le traitement ou d'un éventuel dysfonctionnement de la filière (*rôle « agriculteur – noyer», participant de la DDT n°4, DR*). Néanmoins, ce procédé ajouterait des coûts supplémentaires. Or les abattements requis pour la qualité A sont atteints grâce une filière « Filtre à sable + UV » sans l'ajout d'une chloration. Les autres joueurs n'ont donc retenu cette proposition. Les discussions entre les joueurs ont donc soulevé différents points. Tout d'abord, le maintien de la classe de qualité atteinte en sortie de filière de traitement n'est pas garantie dans le temps compte tenu des éventuelles contaminations post-traitement. Néanmoins, les coûts économiques déjà élevés de la filière de traitement supplémentaire pour atteindre la qualité A pourraient amener une mise de côté de cet élément compte tenu du respect du point de conformité indiqué par le cadre réglementaire.

Toujours lors de l'atelier de la Drôme, les joueurs ont également indiqué le besoin de mettre en place une unité de stockage. Les éventuels impacts de cette unité sur la qualité de l'eau a suscité des interrogations chez les joueurs :

> [Tour 1] *« Si on stocke, on va dégrader la qualité de l'eau » (rôle « agriculteur – noyer», participant de la DDT n°4, DR)*
> *« Elle se dégrade ou elle s'améliore ? » (rôle « collectivité », participant agriculteur/SIID, DR)*
> *« Elle se dégrade. Après sur des stockages couverts, ça coute des prix exorbitants mais ça ne bougera pas trop. Mais sur des stockages ouverts, l'eau se contaminera facilement. » (participant non identifié dans l'enregistrement)*

Néanmoins, aucune réduction log n'est indiquée par l'outil concernant le stockage. En effet, comme indiqué dans le chapitre 1 (section 1.3.2.2), nous avions choisi de ne pas attribuer de réduction log dans notre base de données compte tenu de la trop forte variation associée aux caractéristiques de construction et d'exploitation. La question des joueurs est donc restée sans réponse, indiquant ainsi un besoin de mieux caractériser la contribution du stockage à l'améliorer ou la dégradation de la qualité des EUT.

Pour l'atelier de Clermont-Ferrand, la présence des lagunes de maturation n'a pas amené les joueurs à envisager la mise en place d'un stockage. Plusieurs filières ont été envisagées : « Filtre à sable + UV », « UF + UV » … Le participant de CAM (*rôle « collectivité »*) a fourni différentes informations opérationnelles et économiques concernant les filières de traitement aux autres joueurs, indiquant l'intérêt d'associer des acteurs opérationnels aux discussions.

Pour l'atelier de Porquerolles, les joueurs ont choisi de mobiliser différents procédés : des lagunes de maturation à l'échelle collective, des filtres à sable à l'échelle individuelle et semi-collective. Nous reviendrons sur les raisons associées aux différentes échelles. Les joueurs ont indiqué que le choix des lagunes a été motivé par la configuration du cas réel de Porquerolles : « *On a été super original !* » (joueur non identifié lors de l'analyse de l'enregistrement). Bien qu'un des objectifs associés au jeu de rôles est la mise de côté de la réalité pour explorer d'autres possibilités, les aller-retour entre la simulation et la réalité ne sont pas rares dans la simulation participative. Ces « balancements » favorisent l'apprentissage (Triclot, 2013 cité par Monfort, 2023). Néanmoins, nous verrons dans la quatrième partie que la frontière « floue » entre le cas fictif et le cas réel a suscité un sentiment de confusion chez les joueurs pour les trois ateliers. Concernant le choix du procédé « filtre à sable », ce procédé « seul », c'est-à-dire sans être suivi d'un procédé « UV » ou d'une filière « UV + Chloration », n'était pas proposé dans la base de données. Les joueurs ont donc adapté les données de l'outil pour construire leur propre filière de traitement. Néanmoins, les coûts économiques n'étaient pas disponibles pour ce procédé, ce qui a limité l'estimation des coûts associés aux choix des joueurs. Cela nous a permis d'identifier un besoin de caractériser ce coût.

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

- **Une simulation des coûts et une discussion collective de leur répartition**

Pour les trois ateliers, les joueurs ont pu simuler en direct les coûts associés à l'ajout d'une unité de traitement supplémentaire. Pour l'atelier de la Drôme par exemple, l'investissement dans une filière « Filtre à sable + UV » pour les six joueurs a été estimé à 294 840€ pour un volume traité de 122 850 m^3/an (2,4€/m^3). Concernant les coûts opérationnels, le prix du m^3 revient à 0,46 €/m^3/an au lieu de 0,10 €/m^3/an initialement payé par les joueurs (défini sur la base des données réelles du cas de Clermont-Ferrand).

Pour l'ensemble des ateliers, les joueurs ont tenté différentes configurations pour la répartition des coûts d'investissement et opérationnels : répartition équivalente entre les joueurs, répartition au prorata des besoins en qualité, répartition au prorata des volumes consommés… Bien qu'ils pouvaient se satisfaire de la qualité actuellement atteinte par la station d'épuration, certains joueurs cultivant du maïs semence ont envisagé la possibilité d'une répartition équivalente entre les joueurs :

> [Tour 1] *« C'est sûr que si je regarde qu'à travers mon prisme, je n'ai pas forcément envie de mettre des billes pour vous aider. Après je suis prêt à la jouer collectif, j'attends que ce soit étudié, qu'il y ait des calculs mis en place (…) » (rôle « agriculteur – maïs semence », participant du SMRD, DR)*

La Figure 30 représente deux possibilités pour la répartition des coûts d'investissement.

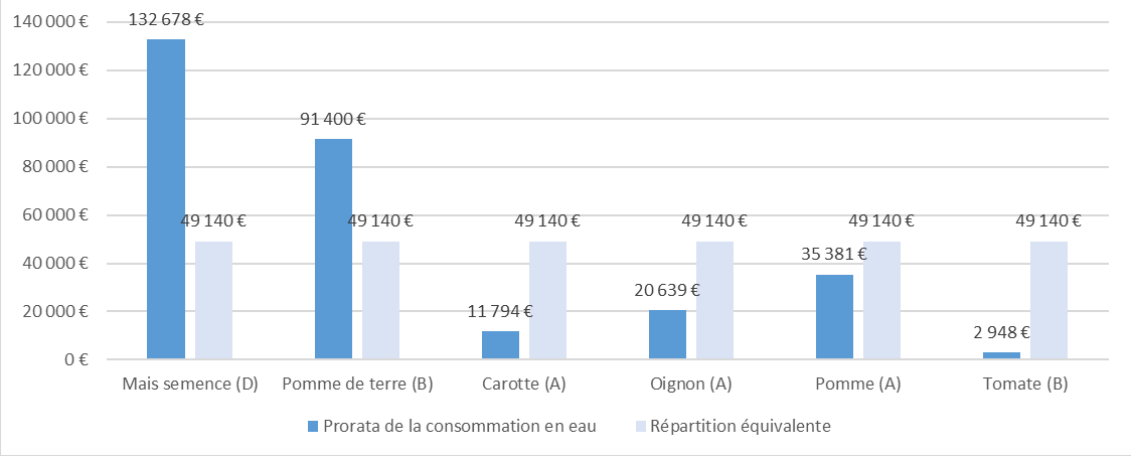


Figure 30 : Différentes configurations envisagées pour la répartition des coûts d'investissement (atelier de la Drôme)

Ainsi, pour les joueurs nécessitant la qualité A, la répartition équivalente des coûts est une situation moins avantageuse qu'au prorata de la consommation en eau. Néanmoins, pour les joueurs qui n'ont pas besoin de la qualité A comme le maïs semence ou la pomme de terre, la répartition équivalente serait plus intéressante. Cependant, les deux configurations ont suscité pour les trois ateliers une réaction d'opposition chez ces joueurs. En effet, dans les deux cas, les coûts semblent trop élevés par rapport aux besoins actuels de ces joueurs en particulier celui cultivant du maïs semence qui peut se satisfaire de la qualité actuellement atteinte en sortie de station d'épuration.

L'ajout d'une telle filière supplémentaire représenterait également une augmentation des coûts opérationnels jugée trop importante par le joueur cultivant du maïs semence (Figure 31).

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

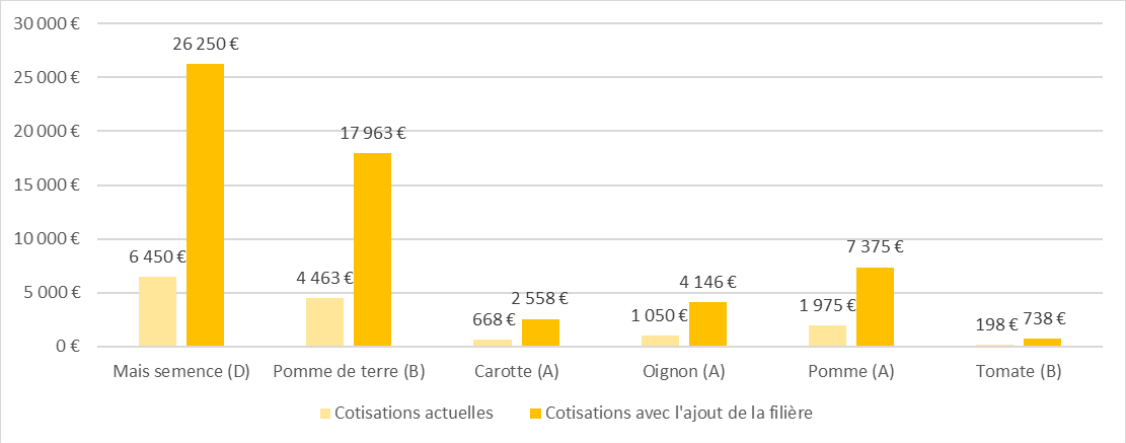


Figure 31 : Estimation des cotisations après ajout de la filière supplémentaire (atelier de la Drôme)

La différence pour le joueur « maïs semence » est bien plus élevée que pour d'autres joueurs comme l'oignon ou la carotte. Certains joueurs ont néanmoins indiqué que les évolutions d'assolement pourraient également concerner ce joueur. Pour les trois ateliers, les joueurs incarnant ce rôle ont indiqué que les perspectives actuelles n'indiquent pas une éventuelle évolution vers une qualité A :

> [Tour 1] *« Pour l'instant je suis dans un système suffisamment intégré et solide pour me dire que je n'ai pas envie de changer » (rôle « agriculteur – maïs semence », participant de la DDT n°1, CF)*

Cela fait écho aux propos mentionnés précédemment sur la présence de systèmes agricoles plus figés que d'autres dans les assolements et donc dans la qualité requise.

Le joueur cultivant du maïs semence possède un pouvoir de décision élevé par rapport aux autres joueurs. En effet, il représente les plus grands besoins annuels en eau, la plus grande surface irriguée mais aussi la plus grande part dans les cotisations annuelles. Les cotisations annuelles sont calculées selon la surface irriguée (95 €/ha) et la consommation en eau (0,10 €/m^3) (Tableau 28). Elles servent à assurer, par exemple, le fonctionnement et la maintenance du réseau de distribution et d'autres charges de l'association.

Système agricole			**Consommation en eau(1)**		**Cotisations**	
Parcelle	*Culture*	*Surface irriguée (ha)*	*Besoins annuels (m3/an)*	*Part dans la consommation totale (%)*	*Total annuel (€/an)*	*Part dans les cotisations totales (%)*
1	Mais semence	10	55 000	45	6 450	44
2	Pomme de terre	7,5	37 500	31	4 463	30
3	Carotte	1,5	5 250	4	668	5
4	Oignon	2	8 600	7	1 050	7
5	Noyer	5	15 000	12	1 975	13
6	Tomate	0,5	1 500	1	198	1
Total	-	**27,2**	**122 850**	-	**14 803**	-

Légende : (1) en supposant un apport assuré à 100% par les EUT

Tableau 28 : Part de la consommation en eau et des cotisations pour chaque joueur, exemple du cas fictif utilisé dans la Drôme

Pour les trois ateliers, le joueur cultivant du maïs semence représente une part importante des cotisations (> 40%) puisqu'il couvre la plus grande surface du périmètre total et la plus grande consommation en eau. La participation financière de ce joueur est donc essentielle au fonctionnement du système :

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

[Tour 1] *« Il faut qu'il arrête de faire du maïs » (rôle « agriculteur – noyer», participant de la DDT n°4, DR)*
« Oui mais s'il arrête le maïs ça va faire augmenter tous les autres » (rôle « collectivité », participant de la Chambre d'A. n°2, DR)

Cette attitude d'opposition face à une répartition équivalente des coûts a également été exprimée par le joueur cultivant de la pomme de terre lors de l'atelier de Porquerolles.

[Tour 1] *« En continuant de faire de la pomme de terre, on perd de l'agent » (rôle « agriculteur – pomme de terre», participant de MTPM n°2, PQ)*

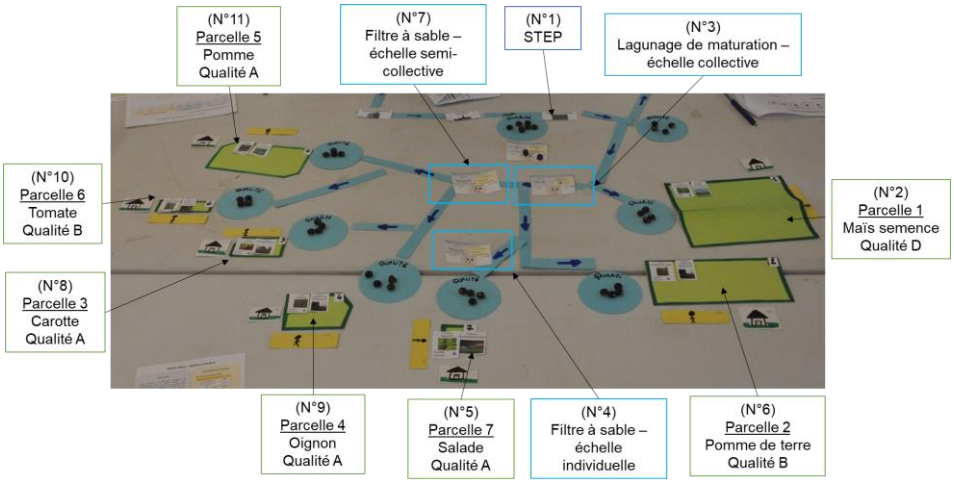
En effet, son besoin actuel est une qualité B et se maintiendra pour l'année suivante. L'investissement dans une qualité A sans être sûr d'en bénéficier à un moment donne le sentiment d'un investissement à perte. Cela fait écho aux propos d'un des joueurs de Clermont-Ferrand questionnant la pertinence d'investir dans un système permettant d'atteindre la qualité A si elle n'est pas réellement nécessaire.

Compte tenu de cette opposition, la mise en place de procédés à l'échelle mutualisée et individuelle a alors été envisagée notamment pour l'atelier de Porquerolles.

3.1.2 Des configurations individuelles et semi-individuelles envisagées face au blocage de certains joueurs

Compte tenu de l'opposition du joueur cultivant de la pomme de terre pour une filière de traitement collective, les joueurs de l'atelier de Porquerolles ont alors imaginé un système à plusieurs échelles :

- Des lagunes de maturation à l'échelle collective (après la branche du réseau pour la parcelle en maïs semence) pour atteindre une qualité B afin de satisfaire le joueur cultivant de la pomme de terre ;
- Un filtre à sable à l'échelle individuelle pour le joueur cultivant de la salade pour ne pas pénaliser le joueur cultivant de la pomme de terre situé sur le même branchement ;
- Un filtre à sable à l'échelle semi-collective pour atteindre la qualité A pour les autres joueurs (Figure 32)



Légende : (N°) = positionnement sur le réseau de distribution

Figure 32 : Mise en place de différentes unités de traitement avancés à plusieurs échelles (Porquerolles)

Comme indiqué par un des joueurs de Clermont-Ferrand, la position de la culture sur le réseau de distribution est déterminante dans le choix de l'échelle à laquelle mettre en place l'unité de traitement supplémentaire (*rôle « agriculteur - carotte », participant de l'Université de CF, CF*). Nous avions

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

montré dans le Tableau 27 que la configuration du réseau de distribution était différente selon les ateliers. Cela pourrait expliquer la raison pour laquelle, dans le cas de Clermont-Ferrand et de la Drôme, l'échelle mutualisée ou individuelle n'ont pas été retenues. Ce résultat indique que le choix du positionnement des parcelles sur le réseau de distribution est un élément clé dans la construction du cas fictif.

Les joueurs ont également apporté d'autres arguments pour ne pas envisager les échelles semi-individuelles et individuelles. Pour la personne de l'Université de Clermont-Ferrand, ces configurations nécessiteraient des compétences qui ne sont pas toujours présentes chez les utilisateurs des EUT. Elles ajouteraient des contraintes supplémentaires à l'échelle d'un ou plusieurs agriculteurs et engageraient leur responsabilité individuelle. A l'échelle individuelle, cela nécessiterait également que la qualité A serait toujours requise par l'agriculteur afin de rentabiliser l'équipement. La capacité d'adaptation de cette configuration face à d'éventuelles évolutions des assolements serait donc limitée. De plus, compte tenu des économies d'échelle, il semblerait que cela soit plus rentable d'avoir un système mutualisé plutôt que plusieurs systèmes individuels.

> [Tour 1] *« La zone qui va être traitée avec l'eau la plus exigeante va évoluer dans le temps. Si on met en place un système figé de traitement supplémentaire juste pour la zone qui était présente au centre au départ … il faut anticiper et prévoir que ce type de traitement complémentaire va devoir évoluer dans le temps pour couvrir une zone plus grand ou une zone très localisée » (rôle « agriculteur - carotte », participant de l'Université de CF, CF)*

Par exemple, dans le cas de la mise en place d'une filière « Filtre à sable + UV » comme imaginée dans le cas de la Drôme, cela reviendrait pour le joueur cultivant de l'oignon à un coût d'investissement de 81 700€ contre 49 140 € en collectif. Les coûts opérationnels sont également plus élevés puisqu'à l'échelle individuelle, le coût est de 0,48 €/m^3/an à l'échelle individuelle contre 0,36 €/m^3/an pour cette filière. Ainsi, en ajoutant les coûts opérationnels déjà effectifs, le coût serait de 0,58 €/m^3/an. Les cotisations totales annuelles pour ce joueur seraient de 5 178 €/an contre 4 146€/an.

Une discussion entre la personne de la DDT et l'agriculteur lors de l'atelier de la Drôme indique que la possibilité de la mise en place de procédés de traitement à l'échelle des agriculteurs n'avait pas été envisagée par l'agriculteur :

> [Tour 1] *« Là on part d'entrée de jeu qu'on fait du collectif donc c'est la collectivité. » (rôle « agriculteur – noyer », participant de la DDT n°4, DR)*
> *« Y'a pas le choix de toute façon » (rôle « collectivité », participant agriculteur/SIID, DR)*
> *« Ah bah si, soit on peut à l'échelle de nos parcelles faire le choix de traiter (…) soit on impose à la collectivité d'avoir une eau de qualité pour le plus contraignant de nous. » (rôle « agriculteur – noyer », participant de la DDT n°4, DR)*

Ce résultat indique l'intérêt des autres joueurs pour explorer d'autres possibilités d'organisation. La personne de la DDT *(rôle « agriculteur – noyer », participant de la DDT n°4, DR)* suggère également l'implication d'un autre acteur dans la prise en charge des coûts : la collectivité en charge de la STEP. Nous allons voir dans la prochaine section que cette possibilité a également été envisagée pour les deux autres ateliers.

3.1.3 L'intégration de la collectivité dans la prise en charge économique et/ou opérationnelle

Pour les trois ateliers, la participation de la collectivité en charge de la station d'épuration a été envisagée à plusieurs niveaux : participation aux coûts d'investissement et/ou opérationnels, prise en

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

charge opérationnelle…Pour les ateliers de Clermont-Ferrand et de la Drôme, la collectivité était incarnée par des joueurs. Pour l'atelier de Porquerolles, elle était incarnée l'animateur en charge du remplissage du modèle informatique (INRAE).

La contribution de collectivité aux coûts d'investissement et/ou opérationnels associés à l'unité de traitement supplémentaire a été justifiée par différents arguments. Tout d'abord, la contribution pourrait être justifiée au nom du développement d'une agriculture alimentaire sur le territoire (*rôle « agriculteur – noyer », participant de la DDT n°4, DR).* En effet, l'atteinte d'une qualité A permettrait de produire des cultures vivrières qui sont contribuent à la souveraineté alimentaire du territoire. De plus, compte tenu des coûts actuellement payés par la collectivité pour sa filière de traitement, l'ajout d'une filière de traitement supplémentaire pourrait ne représenter qu'une faible augmentation. Par exemple, dans le cas fictif, il est supposé que la station d'épuration traite 1 250 000 m^3 par an pour une population d'environ 17 000 habitants. Le traitement actuel représente un coût total d'environ 2 037 500 €/an (en considérant 1,63 €/m^3). En supposant une participation à 20% des coûts opérationnels calculés pour l'atelier de la Drôme, cela représenterait l'ajout de 9 000 €/an. Ainsi, cela représenterait environ 0,50 €/an par habitant. Certains joueurs comme un joueur opérationnel de Clermont-Ferrand ont cependant exprimé leur désaccord, indiquant que la contribution des habitants pour l'accès à l'eau d'irrigation des agriculteurs semble difficilement justifiable. Elle l'est d'autant plus que c'est l'agriculteur produisant du maïs semence, une culture consommatrice en eau, qui en est le bénéficiaire. De plus, les périmètres irrigués peuvent se situer sur des communes différentes de celles des habitants produisant les eaux usées et également profiter à des marchés qui ne sont pas nécessairement locaux.

> [Tour 1] *« Moi en tant qu'usager qui paye sa facture d'eau, j'estime que ce n'est pas à moi de payer les qualités supérieures pour l'irrigation. D'autant plus que si ça se trouve on n'est pas sur la même commune pour les zones d'irrigation » (rôle « collectivité », participant de la CAM, CF)*

Un autre argument avancé est celui de l'amélioration du rejet. Dans notre cas fictif, 80% des EUT produites par la station d'épuration sont rejetées dans le milieu. La concentration en *E.coli* est réduite de 2 log grâce au procédé en boues activées. Ainsi, une concentration de 10^4 UFC/100mL est attendue à la sortie de la station d'épuration puisqu'il est considéré que la concentration initiale est de 10^6 UFC/100mL. La circulation des billes sur le plateau représentant la concentration en *E.coli* dans les eaux usées a suscité des réactions chez certains joueurs. En effet, jusqu'à présent, les stations d'épuration françaises n'étaient pas sujettes à des objectifs de réduction des concentrations en microorganismes pathogènes sauf dans des contextes particuliers (par exemple, en zones sensibles). Certains joueurs se sont interrogés sur cette absence d'exigences compte tenu des exigences poussées demandées pour la REUT. De plus, bien qu'une dilution peut avoir lieu, les eaux de surface où sont rejetées les EUT d'une voire plusieurs stations d'épuration sont utilisées par des agriculteurs pour irriguer leurs cultures. Néanmoins, ces agriculteurs ne sont généralement soumis à aucune contrainte de qualité, contrairement à ceux utilisant des EUT directement à la sortie d'une station d'épuration. Ce cas de figure s'apparente pourtant à de la REUT « *de facto* ». Cet élément a suscité des réactions d'étonnement chez plusieurs joueurs en particulier chez les acteurs opérationnels et de remise en question des critères de qualité imposés à la REUT :

> [Tour 1] *« Moi quand je vois ce schéma y'a quelque chose qui me choque… Après y'a peut-être que moi que ça choque mais y'a déjà tout ce traitement* [nb : en indiquant les lagunes], *alors que les collectivités, elles ont le droit de faire rivière » (rôle « président ASA », participant agriculteur de l'ASA LN, CF)*
>
> *« Vous n'êtes pas en zone de baignade. Y'a que en zone limitrophe ou de certains étangs que vous avez une obligation de traiter sur les rejets » (rôle « collectivité », participant de la CAM, CF)*

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

« Ça me choque quand même » (rôle « président ASA », participant agriculteur de l'ASA LN, CF)

(…)

« Mais là où je vous rejoins c'est que vous venez vous venez prendre de l'eau ici (nb : en montrant la rivière quelques mètres après le rejet), on ne vous embête pas avec tout ça » (rôle « collectivité », participant de la CAM, CF)

« Et c'est complètement ridicule » (rôle « président ASA », participant agriculteur de l'ASA LN, CF)

« Mais c'est la réglementation on n'y peut rien » ((rôle « collectivité », participant de la CAM, CF)

Un point intéressant a néanmoins été soulevé par la personne de CAM lors de l'atelier de Clermont-Ferrand concernant les différences de contraintes associées aux agriculteurs utilisant les EUT et ceux « hors REUT » : d'une certaine façon, les agriculteurs utilisant des EUT « paient la disponibilité ». En effet, en contrepartie de ces exigences élevées, ils sont moins soumis aux restrictions d'usage que les agriculteurs prélevant dans les eaux conventionnelles. Au final, les coûts associés à l'atteinte de la qualité sont à mettre en regard des bénéfices apportés par l'accès aux EUT qui permet un maintien de l'irrigation et donc de la production agricole.

Les joueurs ont également envisagé que l'unité de traitement supplémentaire soit mise en place au niveau de la station d'épuration. En effet, des compétences techniques sont présentes au niveau de la STEP (*rôle « agriculteur - carotte », participant de l'Univ. de CF, CF*), ce qui n'est toujours le cas au niveau des agriculteurs. Des économies d'échelle pourraient éventuellement être réalisées compte tenu des volumes traités. Cette configuration pourrait être intéressante dans le cas du développement d'autres usages de REUT comme, par exemple, les usages urbains comme suggéré par les participants de la CAM et de l'Université de CF. Néanmoins, cette configuration peut présenter certaines limites. Comme indiqué par la personne de l'Université de CF, pour la collectivité, l'amortissement de cet investissement dépendra alors de la demande en EUT des usagers.

[Tour 1] *« C'est une vraie discussion. Y'a des stations qui ont intégré cette partie risque et d'autres qui ne l'intègrent pas. La difficulté c'est que si vous portez au niveau de la collectivité demain vos agriculteurs ils décident de faire de la vigne ils n'ont plus besoin d'eau, vous vous retrouvez avec un investissement qui ne sert plus à rien » (rôle « agriculteur - carotte », participant de l'Univ. de CF, CF)*

La personne de la CAM a également indiqué que, pour les agriculteurs, cela pourrait également supposer que l'EUT qui leur est fournie pourrait ne plus être gratuite :

[Tour 1] *« On peut faire ça* [nb : en enlevant les billes représentant la concentration en *E.coli* après STEP] *mais vous êtes prêt à payer dix fois votre mètre cube d'eau ? » (rôle « collectivité », participant de la CAM, CF)*

En effet, dans le cas réel de Clermont-Ferrand, les EUT sont fournies gratuitement à l'ASA LN. C'est le cas dans de nombreux projets de REUT (Lombard-Latune & Bruyère, 2023).

Ces échanges ont également permis à la personne de la CAM de « transmettre un message » (Becu, 2020) aux autres joueurs, et notamment aux agriculteurs présents, que le développement du multi-usages pourrait avoir des conséquences pour les volumes actuellement disponibles pour la REUT :

[Tour 1] *« Attention à la répartition future des usages. Il va falloir anticiper que d'autres usages vont apparaitre comme l'utilisation en urbain et aussi la production indirecte d'eau potable » (rôle « collectivité », participant de la CAM, CF)*

Au final, compte tenu de ces variations souvent incertaines associés aux volumes que ce soit ceux demandés par les agriculteurs, fournis par la collectivité, demandés par les autres usages, des

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

interrogations émergent concernant le dimensionnement de la filière de traitement mais aussi la pertinence d'un tel investissement.

3.1.4 Conclusion sur les apports de la construction collective du scénario « approche conventionnelle »

En résumé, le premier tour a permis une discussion entre les différentes parties prenantes concernant l'approche « conventionnelle ». Différents éléments ont émergé de cette construction collective et notamment les impacts associés à l'approche conventionnelle. Tout d'abord, compte tenu de la diversité des usages agricoles, les qualités requises peuvent être différentes à l'échelle d'un agriculteur et plus largement d'un périmètre irrigué. Elles peuvent également varier d'une année à l'autre compte tenu des variations des assolements. Cette variation n'est toutefois pas toujours prévisible. L'atteinte de la qualité la plus stricte (A) permettrait une flexibilité dans les assolements. Néanmoins, les volumes nécessaires en qualité A à l'échelle du périmètre sont à évaluer afin de vérifier la pertinence, notamment économique, d'atteindre une telle qualité. Ainsi, si la majorité du périmètre ne nécessite pas une qualité aussi stricte, l'investissement dans une unité de traitement supplémentaire pour atteindre cette qualité ne serait pas rentabilisé.

Bien que des économies d'échelle peuvent être réalisées lorsque l'unité est mise en place à l'échelle collective, l'ajout d'une unité supplémentaire risque de se répercuter sur le coût du m^3 d'EUT. Les agriculteurs dont les consommations en eau sont élevées seront fortement impactés. En l'absence d'un besoin d'une telle qualité, cette augmentation est difficilement justifiable pour ces agriculteurs. Si les cultures nécessitant la qualité A représentent une faible proportion du périmètre, des restrictions sur les usages pourraient alors être appliquées. Cela impacterait les cultures des qualités les plus strictes et donc les cultures alimentaires consommées crues. La contribution de la REUT aux enjeux sociaux de la souveraineté alimentaire est alors questionnée.

Néanmoins, d'autres acteurs pourraient être associés dans la prise en charge de l'unité de traitement supplémentaire. C'est le cas notamment de la collectivité au nom, notamment, du développement ou du maintien d'une agriculture contribuant à la souveraineté alimentaire. De plus, compte tenu de la qualité actuelle du rejet des stations d'épuration, la mise en place de procédés de traitement supplémentaire pourrait également contribuer à améliorer la qualité de son rejet dans le milieu. Cela souligne un bénéfice associé aux procédés de traitement supplémentaire.

L'absence de contraintes microbiologiques pour le rejet de la station d'épuration dans le milieu (hors zones sensibles), de même que pour l'irrigation agricole qui prélève en aval dans ce milieu, a amené une réflexion collective concernant les exigences imposées à la REUT. Ces exigences semblent, en effet, assez strictes par rapport aux autres usages. Nous allons voir que la construction du scénario *multi-barrières* a mis en lumière l'existence d'un certain nombre de mesures *barrières* au-delà du traitement qui renforce la remise en question des exigences de qualité et la pertinence de mettre en place une filière très poussée de traitement. Cette pertinence est d'autant plus questionnable qu'au final, des re-contaminations post traitement peuvent avoir lieu au niveau des réseaux de distribution ou de l'unité de stockage.

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

3.2 L'identification de mesures *barrières* déjà mises en place à travers les équipements utilisés et les pratiques culturales et d'irrigation

Nous allons maintenant nous intéresser au deuxième tour qui était consacré au scénario *multi-barrières.* L'état de l'art sur l'approche *multi-barrières* présenté dans le chapitre 1 a montré qu'un certain nombre de mesures *barrières* peuvent être mises en place au-delà de la station d'épuration. Nous avons vu que ces mesures ont des contributions à la réduction des risques, des spécificités organisationnelles ainsi que des coûts économiques qui peuvent être différents. La littérature encourage l'implication des acteurs dans la construction des choix et notamment des acteurs opérationnels. Cette implication collective est d'autant plus nécessaire que certaines mesures reposent sur la responsabilité individuelle. Les travaux sur l'approche *multi-barrières* ont montré qu'il est important que les agriculteurs puissent s'exprimer sur les mesures envisageables et également proposer des mesures.

Pour construire ce scénario, les joueurs repartent de la situation initiale, c'est-à-dire sans unité de traitement supplémentaire au niveau de la station d'épuration. Les joueurs doivent construire un scénario correspondant à l'autre approche de gestion envisagée par la réglementation : l'approche « multi-barrières ». L'objectif à atteindre n'est plus un objectif de qualité mais un objectif lié à la santé (10^{-6} DALYs pppa). Le processus de construction de ce scénario est organisé en plusieurs étapes. Tout d'abord, les joueurs doivent construire des scénarios d'exposition, c'est à dire identifier les populations exposées et leur attribuer une voie d'exposition (Etape 1). Ensuite, les joueurs identifient les mesures de gestion déjà mises en place à leur échelle (Etape 2). Une évaluation des risques est ensuite réalisée grâce au modèle informatique. Les DALYs perdus pppa sont calculés pour chaque scénario d'exposition. Si les objectifs ne sont pas atteints pour l'ensemble des populations exposées, les joueurs définissent des mesures *barrières* supplémentaires (Etape 3).

Contrairement aux scénarios d'exposition qui sont construits par les joueurs (Etape 1), les mesures *barrières* mises en place par chaque joueur sont prédéfinies dans leur rôle et indiquées sur leur fiche « joueur » (Annexe 6 p.256). Le Tableau 29 présente un résumé des différentes mesures mises en place à l'échelle des joueurs :

Mesures existantes	Culture	Contribution sanitaire	Voie(s) concernée(s)	Population(s) concernée(s)	Réduction attribuée
Boues activées	-	Concentration	Toutes	Tous	2 log (bactéries), 2 log (virus), 1 log (protozoaires)
Lagunage de maturation	-	Concentration	Toutes	Tous	3 log (bactéries), 1,5 log (virus), 3 log (protozoaires)
Irrigation automatique	Toutes	Exposition	-	Personnel d'irrigation	Absence d'exposition
Micro-aspersion	Carotte, pomme, noyer, salade	Exposition		Riverains, passants(1)	Absence d'exposition
		Volume	Toutes	Personnel d'entretien, personnel de récolte, passants, consommateurs	« Air », « Eau », « Sol » = 1 log « Produit » (carotte) = 1 log « Produit » (pomme, noyer) = 4 log(2) « Produit » (salade) = 1 log
Irrigation – Goutte à goutte	Tomate	Exposition		Riverains, passants	Absence d'exposition
	Tomate	Volume	Plante, produit	Personnel d'entretien, personnel de récolte, consommateurs	« Plante », « Produit » (+50cm)= 5 log ou 4 log (3)
Entretien mécanisé	Pomme de terre, carotte, oignon, noyer	Exposition	-	Personnel d'entretien	Absence d'exposition
Récolte mécanisée	Maïs semence, carotte, oignon, noyer	Exposition	-	Personnel de récolte	Absence d'exposition
Choix de cultures non alimentaires	Maïs semence	Exposition	-	Consommateurs	Absence d'exposition

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

Attente d'un temps de dépérissement	Maïs semence[4]	Concentration	Plante	Personnel d'entretien, consommateurs	4 log (bactéries) et 2 log (virus, protozoaires) (pour 4 jours)
	Carotte [5]	Concentration	Produit	Consommateurs	+7 log (bactéries, virus, protozoaires) [6]
Cuisson	Pomme de terre	Concentration	Produit	Consommateurs	5 log (bactéries, virus, protozoaires)
Séchage	Oignon, noix	Concentration	Produit	Consommateurs	2 log (bactéries, virus, protozoaires)
Pelage	Oignon, noix	Volume	Produit	Consommateurs	2 log
Lavage à l'eau potable	Carotte[7], noix[8], tomate[7],salade[8]	Volume	Produit	Consommateurs	1 log

Légende : (1) : non-exposition des passants indiquée uniquement pour Clermont-Ferrand ; (2) : partie comestible à plus de 50cm du jet d'irrigation ; (3) : la réduction attribuée a varié avec les évolutions réglementaires, une réduction de 5 log correspond aux directives australiennes (2006) et a été utilisée à Clermont-Ferrand. Une réduction de 4 log correspond à l'AF du 18/12/2023 et a été utilisée dans la Drôme et à Porquerolles ; (4) : entre la dernière irrigation et l'entretien de la culture ; (5) : entre la dernière irrigation et la récole, non intégrée pour Clermont-Ferrand ; (6) : atteinte de la réduction indiquée par l'OMS (2006) pour assurer une protection suffisante ; (7) : uniquement pour Clermont-Ferrand, mise en place à l'échelle du consommateur ; (8) : échelle non précisée conso ; en bleu : mesures « Qualité » ; en jaune : mesures « Equipements » ; en vert : mesures « Pratiques culturales et d'épandage ».

Tableau 29 : Mesures barrières déjà mises en place à l'échelle des différents joueurs

En effet, l'objectif de l'évaluation des risques était de laisser les joueurs exprimer leur perception des risques et de confronter leurs subjectivités. Pour les mesures *barrières*, l'objectif était de mettre en lumière la contribution des pratiques existantes à la réduction des risques mais aussi de discuter notre base de données. Les mesures *barrières* définies lors de l'état de l'art et de la co-construction avec le cas de Clermont-Ferrand ont ainsi été discutés, complétées et remises en question par les joueurs.

Comme indiqué dans le Tableau 29 présenté précédemment, les mesures *barrières* attribuées et les réductions log associées ont parfois varié selon les ateliers compte tenu des évolutions réglementaires et de l'avancée des recherches bibliographiques. Nous allons voir que ces choix ont influencé les résultats produits lors de la simulation et les conclusions associées.

Les sections suivantes seront donc consacrées aux différentes étapes de construction du scénario *multi-barrières.* Nous n'entrerons cependant pas dans les détails pour la construction des scénarios d'exposition (Etape 1) puisqu'elle fera l'objet de la deuxième partie de ce chapitre.

3.2.1 Des mesures barrières existantes contribuant à empêcher l'exposition des populations (Etape 1)

Le Tableau 29, présenté précédemment, montre que les pratiques existantes et les équipements utilisés contribuent à empêcher l'exposition de certaines populations. Dans cette section, nous allons voir que la contribution de certaines mesures *barrières* a été remise en question par les joueurs. Des informations supplémentaires ont également été apportées comme de nouvelles mesures *barrières.*

Compte tenu de certaines similitudes entre les rôles des joueurs (système d'irrigation automatique, entretien ou récolte mécanisé(e)…), le processus de réflexion a parfois été similaire ainsi que les résultats produits. Les résultats seront donc présentés par mesures *barrières* plutôt que par culture et pour l'ensemble des trois ateliers.

3.2.1.1 Utilisation de systèmes d'irrigation automatique et mécanisation des étapes d'entretien et de récolte

Pour chaque joueur, la culture est irriguée avec un système d'irrigation automatique. Dans son étude de 2012, l'Anses considère que l'évaluation des risques associés à l'inhalation des aérosols par les

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

professionnels n'est pas nécessaire puisqu'ils ne sont pas présents dans les champs au moment de l'irrigation (Anses, 2012). En effet, contrairement à des systèmes d'irrigation manuels (arrosoirs, tuyaux d'arrosage…), le personnel en charge de l'irrigation n'a pas besoin d'être présent au moment de l'irrigation. Sur les fiches des joueurs, il était donc indiqué que le personnel d'irrigation n'est pas exposé lors de l'utilisation de systèmes d'irrigation automatique. Cette indication a été remis en question à plusieurs reprises par les joueurs, en particulier par les agriculteurs présents. En effet, les professionnels peuvent intervenir lors de l'irrigation : maintenance du réseau de distribution, gestion de défaillances du système, mise en place de certains systèmes d'irrigation.

[Tour 2, étape 1] *« On a toujours un problème au niveau du réseau d'irrigation, c'est mécanique, il faut toujours intervenir dessus » (rôle « agriculteur – maïs semence », participant de l'ASDFV n°1, PQ)*

-

[Tour 2, étape 1] *« L'enrouleur et la borne elles s'ouvrent pas toute seule » (rôle « président ASA », participant agriculteur de l'ASA LN, CF)*
« Oui mais l'irrigation est automatique, il n'est pas d'exposé c'est dans mon rôle c'est comme ça » (rôle « agriculteur – maïs semence », participant de la DDT n°1, CF)
« Oui mais faut déplacer l'enrouleur, faut manipuler les équipements » (rôle « président ASA », participant agriculteur de l'ASA LN, CF)

Ils peuvent donc être exposés à des gouttelettes d'eau. Ils peuvent également être présents dans les champs au moment de l'irrigation et être exposés aux aérosols.

La remise en question de cette mesure a varié selon les ateliers. Dans le cas de Clermont-Ferrand où l'identification a été collective, les acteurs opérationnels ont apporté ces informations aux autres joueurs dès le début de l'étape d'identification. Dans le cas de Porquerolles, l'identification a d'abord été réalisée en binôme. L'exposition du personnel d'irrigation n'a pas été indiquée par la majorité des binômes (trois sur quatre) où un membre de l'association en charge de l'irrigation des cultures (ASDFV) n'était pas présent. Sur les trois binômes où était présent l'ASDFV, deux binômes ont indiqué l'exposition du personnel d'irrigation. La présence d'agriculteurs parmi les joueurs a donc contribué à apporter cette information.

Pour certains systèmes, les étapes d'entretien et/ou de récolte sont réalisées de manière mécanique. Comme indiqué dans le Chapitre 2, les échanges avec certains acteurs de Clermont-Ferrand lors de la phase de co-construction de l'outil avaient amené à considérer que la mécanisation des étapes du cycle cultural contribuait à éviter l'exposition du personnel d'entretien et de récolte. En effet, le personnel se trouve sur des machines et n'est alors pas au contact de la plante ou du sol. Pour certaines cultures comme la pomme de terre, la carotte ou l'oignon, il était indiqué que ces étapes sont mécanisées et que la mesure *barrière* « *mécanisation* » était appliquée. Cela a donc amené des joueurs à ne pas retenir l'exposition de ces populations soulignant l'influence des informations apportées par l'outil dans le choix des joueurs :

[Tour 2, étape 1] *« Y'a pas de personnel d'entretien ? » (rôle « collectivité », participant agriculteur/SIID, DR)*
« C'est marqué, c'est comme ça c'est marqué » (rôle « agriculteur – carotte », participant de la C3PS, DR)
« Je vais faire du mécanique alors ! » (joueur non identifié)

La formulation du dernier *verbatim* suggère néanmoins une certaine réserve quant à la contribution de cette mesure. La contribution de cette mesure a été, en effet, remise en question par certains joueurs. Par exemple, pour l'atelier de Porquerolles, les joueurs cultivant de l'oignon ont considéré que le personnel d'entretien et de récolte étaient exposés bien que l'entretien et la récolte soient mécanisés. Les joueurs du binôme cultivant de la pomme de terre (incarné par un participant

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

opérationnel et un participant institutionnel) qui avaient indiqué l'absence de l'exposition du personnel d'entretien lors de l'étape 1 du processus de construction compte tenu de la mécanisation, ont exprimé des doutes concernant leur choix :

> [Tour 2, étape 2] *« On disait que c'est mécanisé mais si l'agriculteur descend pour faire quelque chose sur sa machine ou enlever des pommes de terre coincées … » (rôle « agriculteur – carotte », participant de la C3PS, DR)*

Ce résultat indique des doutes concernant la contribution effective de cette mesure.

3.2.1.2 Contribution des systèmes d'irrigation à faible pression (microaspersion)

Dans les trois cas fictifs, des habitations (10m) et un chemin de passage (5m) étaient situés à proximité de chaque périmètre irrigué. Pour l'atelier de Clermont-Ferrand, il était indiqué sur les fiches que l'utilisation de systèmes d'irrigation par microaspersion contribuait à empêcher l'exposition des riverains et des passants. La personne de l'Université de Clermont-Ferrand a remis la contribution de cette mesure en particulier lors d'épisodes venteux :

> [Tour 2, étape 1] *« S'il y a du vent, ils* [nb : les passants] *vont être exposés. Les riverains aussi, parce que si y a du vent ça va diffuser. Je ne crois pas trop dans ces modèles de l'arrêt de l'EUT à l'arrêt du chemin. Ce qui est marqué dans le scénario, pour moi ce n'est pas réalisable. Même en micro-aspersion il y a une création de particules dans l'air, elles ne vont pas s'arrêter à la barrière pile (…) » (rôle « agriculteur - carotte », participant de l'Univ. de CF, CF)*

Les contraintes de distance indiquées dans le cadre réglementaire ont également été discutées remettant ainsi également en question la contribution de la mesure *barrière « mise en place d'une distance entre le périmètre irrigué et les habitations* » :

> [Tour 2, étape 1] *« Il y a des préconisations pour mettre des distances minimales entre les habitations ou des mesures qui préconisent l'interdiction d'utilisation des chemins qui longent des champs pendant la période d'irrigation. Ce n'est pas quelque chose de réalisable. Les respects de ces distances, je ne vois pas comment on peut le mettre en place de façon efficace. A partir du moment où un vent à 10km/h y'aura une diffusion » (rôle « agriculteur - carotte », participant de l'Univ. de CF, CF)*

Une modification de l'outil avait été intégrée pour les ateliers de la Drôme et de Porquerolles : la contribution des systèmes d'irrigation par micro-aspersion avait été retirée pour les passants compte tenu des risques de dérive. Elle a néanmoins été maintenue pour les riverains. En effet, selon l'arrêté du 18/12/2023, pour les asperseurs de faible portée (<10m) et en l'absence d'écran, une distance de deux fois la portée est suggérée. Ainsi, en nous basant sur les travaux de Molle *et al.* (2009), nous avons considéré que la portée du micro-asperseur est de 4m. Les riverains étant situés à une distance de 10m, la distance entre le périmètre et les habitations est donc supérieure à deux fois la portée. De plus, la hauteur de projection des systèmes d'irrigation par microaspersion est bien plus basse que pour les systèmes d'irrigation par aspersion. Compte tenu de ces éléments, nous avons donc fait le choix de considérer que les riverains pouvaient être considérés comme non-exposés. Pour les passants, il était indiqué qu'une réduction de 1 log était considérée compte tenu du plus faible débit et de la hauteur de projection (cf Chapitre 1). Les résultats obtenus ont varié entre les deux ateliers. Par exemple, pour la carotte irriguée en microaspersion, il a été considéré que les passants n'étaient pas exposés lors de l'atelier la Drôme. Pour l'atelier de Porquerolles, il a été considéré qu'ils étaient quand même exposés aux aérosols. C'est le cas également pour la pomme irriguée également en microaspersion.

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

L'identification des riverains et des passants comme populations exposées lors de l'utilisation des systèmes par aspersion a fait en évidence des différences de représentations sur les risques associés à ces systèmes. Nous reviendrons sur cet élément dans la deuxième partie. Néanmoins, la personne de la Chambre d'agriculture de la Drôme a indiqué que certains agriculteurs utilisaient des buses anti-dérive contribuant à limiter l'arrosage des chemins ou des jardins. Cet élément fait écho aux directives de l'OMS et australiennes de 2006 qui considèrent que l'utilisation de ces buses contribuent à une réduction de 1 log. Nous n'avions néanmoins pas indiqué cette mesure dans les cartes *barrières*, montrant ainsi un apport de la part des joueurs du domaine agricole.

3.2.1.3 Contribution des systèmes d'irrigation localisée (goutte à goutte)

Lors de l'utilisation de système d'irrigation en goutte à goutte, l'eau est apportée au pied de la plante. Dans notre modèle, il a été considéré que les riverains et les passants n'étaient pas exposés. A la lecture de la carte, la personne de l'ARS de la Drôme a exprimé une certaine réserve concernant cette mesure :

« Pas d'exposition des riverains et des passants …mais bon … y'a pas d'exposition apparemment puisqu'on est sous serre et que l'irrigation elle se fait au pied de la tomate » (rôle « agriculteur – tomate », participant de l'ARS n°2, DR)

Au final, la réflexion suscitée par les informations indiquées sur les cartes *barrières* a amené ce joueur à valider la contribution de la mesure pour les riverains et les passants. Il a également considéré que les consommateurs n'étaient pas exposés, bien que ce n'était pas indiqué sur les supports :

« Les tomates elles poussent comment ? Je ne connais pas bien (..) Elles ne vont pas être exposées au sol qui va être arrosé. Donc à la limite, ils n'ont pas de raison d'être exposé parce que la tomate elle a pas été aspergée » (rôle « agriculteur – tomate », participant de l'ARS n°2, DR)

Pour l'atelier de Porquerolles, un des membres de l'ASDFV (n°2) incarnant le rôle de l'agriculteur cultivant de la tomate a indiqué qu'un paillage étant présent et que cela permettait de considérer une absence d'exposition pour le personnel d'entretien et de récolte ainsi que pour le consommateur. Cette élément n'était pas indiquée comme mesure *barrière* sur la fiche du joueur. Le joueur a indiqué que dans la réalité, les goutteurs étaient situés sous au paillage, ce qui expliquait son choix. Le paillage fait écho à la mesure *barrière* « *bâche de séparation* » qui consiste à mettre une bâche plastique entre les goutteurs et les parties comestibles de la culture.

3.2.1.4 Conclusion sur la contribution des mesures barrières existantes pour empêcher l'exposition

Il était indiqué aux joueurs que certains équipements utilisés et certaines pratiques culturales agissent comme des mesures *barrières* en empêchant l'exposition de certaines populations. Ces éléments ont été définis à partir des résultats de la littérature (Chapitre 1) et la co-construction avec le cas de Clermont-Ferrand (Chapitre 2). La contribution de certaines mesures *barrières* a été remise en question par les joueurs : utilisation de système d'irrigation automatique limitant l'exposition du personnel d'irrigation, mécanisation des étapes d'entretien et de récolte limitant l'exposition du personnel intervenant pour ces étapes, utilisation de systèmes d'irrigation fonctionnant à faible pression (micro-aspersion) et/ou localisés pour réduire l'exposition des riverains et des passants… Ces éléments n'ont pas toujours été questionnés selon les ateliers pouvant indiquer une appropriation et une perception parfois différente des informations par les joueurs. De nouvelles *barrières* ont également émergées comme le paillage ou les buses anti-dérive.

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

3.2.2 Des mesures barrières existantes contribuant à réduire la dose d'exposition (Etape 2)

Comme indiqué dans le Tableau 29 présenté précédemment, certains équipements utilisés et certaines pratiques culturales et d'irrigation mises en place contribuent à réduire la dose d'exposition. Ainsi, certaines agissent sur la concentration en microorganismes pathogènes (dépérissement naturel, préparations post-récolte…). D'autres agissent sur le volume d'exposition (systèmes d'irrigation localisés…). Les joueurs identifient ces mesures grâce à leur fiche « joueur ». Leur contribution permet alors soit de réduire les billes de concentration sur le plateau, soit de diminuer l'échelle du volume également symbolisée sur le plateau. Une évaluation des risques est également réalisée en direct grâce au modèle informatique. Les DALYs perdus par an et par an (pppa) sont calculés indiquant ainsi la contribution des mesures *barrières* existantes et un éventuel besoin de mesures *barrières* supplémentaires.

Avant de présenter les résultats obtenus, il est nécessaire de préciser certains éléments concernant les paramètres du modèle. Tout d'abord, à l'issue des trois ateliers, nous avons également identifié une erreur concernant un des paramètres du modèle dose-réponse de norovirus. Pour le paramètre P, nous avions pris la valeur de 1,106 au lieu de 1106 ce qui a entrainé la production de résultats faussés pour norovirus. Ainsi, pour l'atelier de Clermont-Ferrand, les objectifs sur la santé étaient atteints grâce à la filière de traitement et aux mesures *barrières* existantes pour l'ensemble des micro-organismes pathogènes sauf pour norovirus. Les joueurs ont dû réfléchir à des mesures supplémentaires à mettre en place. A l'issue de l'atelier, une simulation des résultats avec le paramètre modifié a été réalisée et a montré que les objectifs étaient en fait atteints pour l'ensemble des populations exposées. Les discussions entre les joueurs sont donc basées sur ces résultats. L'erreur dans le modèle dose-réponse a également impacté les résultats produits pendant les ateliers de la Drôme et de Porquerolles. Néanmoins, ils l'étaient dans une moindre mesure puisque les objectifs liés à la santé n'étaient pas atteints pour les autres micro-organismes, et non pas uniquement pour norovirus. Des mesures supplémentaires étaient donc nécessaires pour certaines populations exposées.

De plus, les paramètres se basent sur des données de la littérature et, comme indiqué dans le chapitre 1, il existe des incertitudes concernant certains paramètres. En se basant sur la littérature et en particulier les travaux de Molle *et al.* (2009), une formule avait été initialement développée pour calculer la proportion d'aérosols et de gouttelettes produites en considérant des paramètres tels que le débit du système d'irrigation, la distance vis-à-vis du jet d'irrigation ou encore la vitesse du vent. Les volumes alors estimés étaient de l'ordre de la dizaine de mL. Ils ont été utilisés pour les scénarios d'exposition des riverains et des passants pour l'atelier de Clermont-Ferrand. Les recherches bibliographiques nous ont ensuite amenés à remettre en question notre formule et à la modifier pour les autres ateliers. Pour les ateliers de Porquerolles et de la Drôme, les volumes d'exposition sont de l'ordre du mL. Ces estimations nous paraissaient plus cohérentes avec les données des directives australiennes (2006) et les travaux de Zardari *et al.* (2022). Néanmoins, de grandes incertitudes persistent sur notre formule. Les résultats concernant les risques associés aux riverains et aux passants pourraient donc éventuellement correspondre à une sur-estimation des risques. Il avait également été considéré pour cet atelier que les lagunes de maturation contribuent à une réduction de 3 log pour les bactéries, 3 log pour les virus et 2 log pour les protozoaires. Les évolutions des recherches bibliographiques nous ont amenés à modifier par la suite ces éléments et à considérer une réduction de 2 log pour les bactéries, 1,8 log pour les virus et 3 log pour les protozoaires. Malgré certaines interrogations sur les paramètres et l'influence qu'ils ont pu avoir sur les conclusions des joueurs associées aux résultats, l'exercice a permis des échanges intéressants entre les joueurs au sujet des mesures *barrières* et leur contribution à la réduction de la dose d'exposition.

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

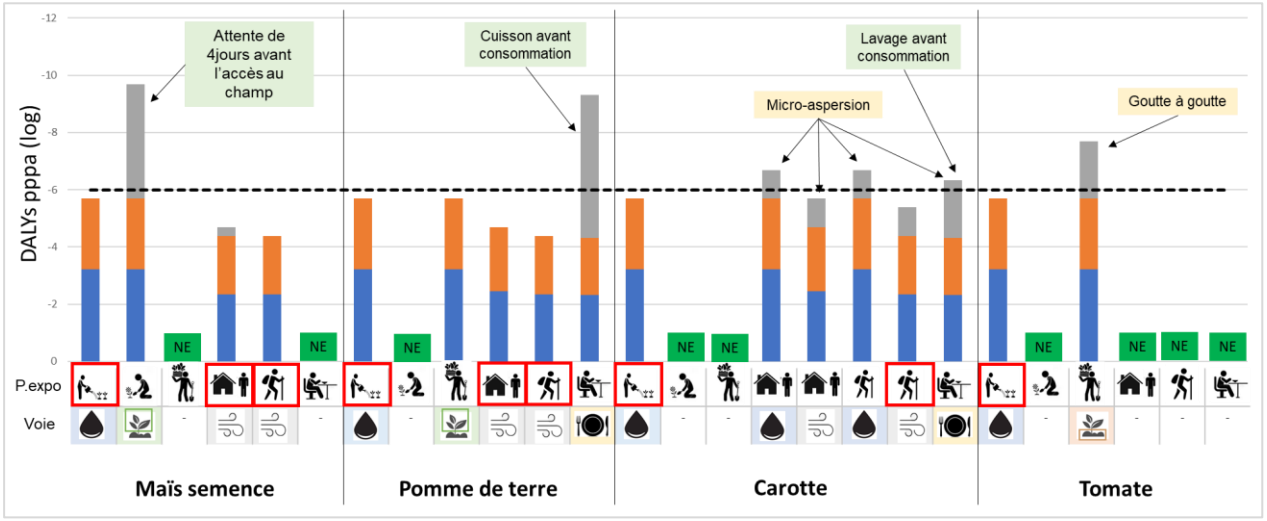
Il est important également de préciser que les discussions suscitées par la construction du premier scénario ont réduit le temps disponible pour la construction du deuxième scénario et en particulier l'étape d'identification des mesures *barrières* existantes et celle consacrée aux mesures à mettre en place. Les discussions entre les joueurs pour ces étapes ont donc été limitées dans le temps.

Pour faciliter la présentation des résultats obtenus lors des ateliers, les résultats produits par *l'Excel* ont été résumés dans des figures réalisées après les ateliers. Pour rappel, la QMRA a été réalisée à partir de filières de traitement différentes entre l'atelier de Clermont-Ferrand (boues activées + lagunage de maturation) et ceux de Porquerolles et de la Drôme (boues activées).

3.2.2.1 Résultats obtenus pour l'atelier de Clermont-Ferrand

- **Analyse des résultats de l'évaluation des risques intégrant les mesures *barrières* existantes**

Les résultats de la QMRA intégrant la contribution des mesures *barrières* déjà en place sont présentés en Annexe 11. La Figure 33 présente un résume des résultats pour les quatre cultures étudiées lors de l'atelier de Clermont-Ferrand. Nous avons choisi de présenter les résultats obtenus pour norovirus puisque les joueurs ont réfléchi leur scénario de gestion « multi-barrières » à partir de ces résultats.



Légende :

	Personnel d'irrigation		*Passants*		*Voie « Plante »*	*En bleu*	*Contribution de la station d'épuration*	NE	*Population non exposée*
	Personnel d'entretien		*Consommateurs*		*Voie « Sol »*	*En orange*	*Contribution du traitement avancé*		
	Personnel de récolte		*Voie « Eau »*		*Voie « Produit »*	*En gris*	*Contribution des mesures barrières existantes*		*Objectif de santé non atteint*
	Riverains		*Voie « Air »*	------	*Objectif de santé à atteindre (≤10^{-6} DALYs pppa)*	*En vert clair*	*Mesures barrières « Pratiques culturales »*	*En jaune*	*Mesures barrières « Equipements »*

Figure 33 : Résultats de la QMRA pour les risques associés à norovirus pour l'atelier de Clermont-Ferrand

La Figure 33 présente les DALYs $_{pppa}$ chaque population associés à norovirus en intégrant la contribution des différentes mesures *barrières* existantes :

- de la station d'épuration (*histogramme bleu*) ;
- des lagunes de maturation (*histogramme orange*)
- des mesures barrières existantes (*histogramme gris*).

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

Les résultats indiquent aux joueurs que la contribution de la station d'épuration ne permet pas l'atteinte de l'objectif de santé (≤ 10^{-6} DALYs $_{pppa}$) pour l'ensemble des populations exposées dans le cas de norovirus. Les lagunes de maturation contribuent à approcher l'objectif lié à la santé mais l'objectif n'est pas encore atteint. L'objectif est presque atteint pour les populations dont les volumes d'exposition sont assez faibles (personnel d'irrigation pour l'ensemble des cultures, personnel de récolte pour la tomate ou d'entretien pour la pomme de terre…). En intégrant la contribution des mesures *barrières* existantes, les objectifs sont alors atteints pour la plupart des populations exposées. Ils ne sont néanmoins pas atteints pour les riverains et les passants des parcelles irriguées en aspersion (rampe ou canon sur enrouleur), le personnel de récolte de la pomme de terre ainsi que pour le personnel d'irrigation de l'ensemble des parcelles.

Concernant les autres micro-organismes dont les résultats sont présentés en Annexe 11, les objectifs liés à la santé sont atteints pour l'ensemble des populations exposées pour campylobacter et cryptosporidium grâce aux lagunes de maturation. Concernant rotavirus, des risques persistent après les lagunes de maturation. Certaines mesures *barrières* contribuent à atteindre les objectifs (cuisson, microaspersion…). Contrairement aux deux autres ateliers, l'attente d'un mois entre la dernière irrigation et la récolte pour la carotte n'a pas été intégrée pour cet atelier. Une réduction encore plus importante pourrait être considérée. Les résultats montrent que des risques persistent toutefois encore pour les riverains et les passants.

- **Remise en question de la contribution de certaines mesures *barrières* par les joueurs**

Lors de cette étape, certaines mesures *barrières* existantes ont été discutées. C'est le cas, par exemple, des préparations post-récolte mises en place par le joueur « habitant ». Pour rappel, lors de l'atelier de Clermont-Ferrand, un des joueurs incarnant les habitants de la commune qui consomment les produits irrigués avec des EUT. L'objectif était d'aborder la contribution du consommateur avec les joueurs. Ce rôle a ensuite été supprimé pour les deux autres ateliers compte tenu de son faible pouvoir d'action. Il était indiqué sur la fiche « joueur » des habitants que les carottes et les tomates étaient lavées avant consommation (1 log). Pour certains joueurs, cette mesure n'est pas nécessairement appliquée par les consommateurs et que son application varie selon les cultures :

> [Tour 2, étape 2] *« Pour la carotte, je comprends le lavage mais pour la tomate … on ne lave pas forcément ses tomates » (rôle « collectivité », participant de la CAM, CF)*

Ce résultat fait écho aux questionnements concernant l'intégration des consommateurs dans la gestion des risques (cf Chapitre 1). Dans le cas de la pomme de terre, il a été souligné que l'exposition des consommateurs peut survenir, non pas par l'ingestion du produit final qui est finalement lavé, épluché et cuit, mais plutôt par l'ingestion en amont suite à un contact cutané avec le produit final sur lequel persistent des micro-organismes pathogènes :

> [Tour 2, étape 2] *« On peut avoir des particules de sol qui restent au moment de la commercialisation. Le consommateur va être en contact avec la terre qui est considérée comme contaminée. On est sur des niveaux qui sont pas réalistes, on ne mangera plus rien » (rôle « agriculteur - carotte », participant de l'Univ. de CF, CF)*

Cela pourrait être une des raisons pour lesquelles cette mesure n'est pas considérée dans l'AF du 18/12/2023. Ces éventualités ont amené certains joueurs à questionner le niveau de détails amené par la prise en compte de ces mesures. Nous reviendrons sur cet élément dans la deuxième partie.

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

- **Modification « post-atelier » des paramètres et résultats obtenus**

A l'issu de l'atelier, nous avons utilisé le modèle en corrigeant le paramètre du modèle dose-réponse de norovirus et en réduisant la contribution des lagunes de maturation (Figure 34).

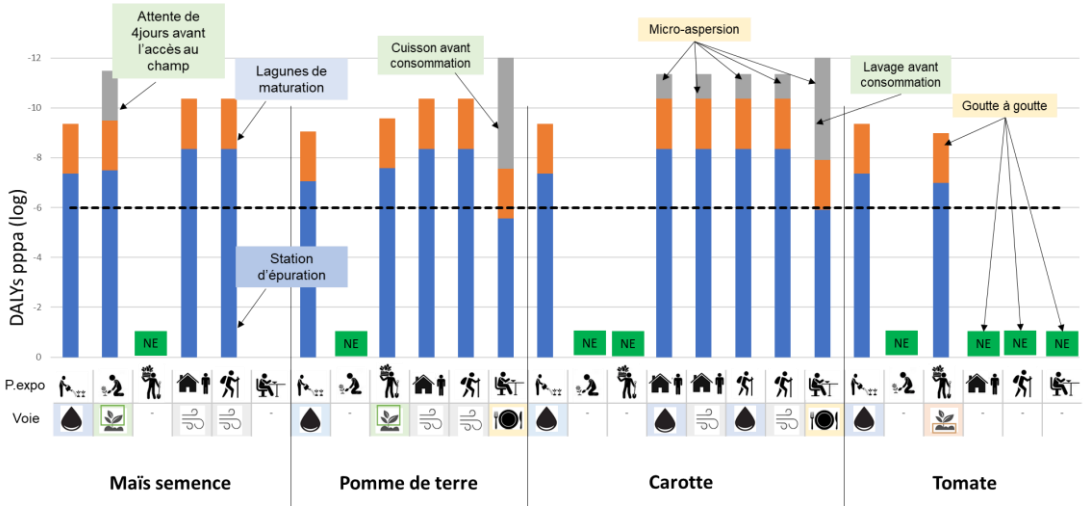


Figure 34 : Résultats de la QMRA pour les risques associés à norovirus pour l'atelier de Clermont-Ferrand après modification des paramètres

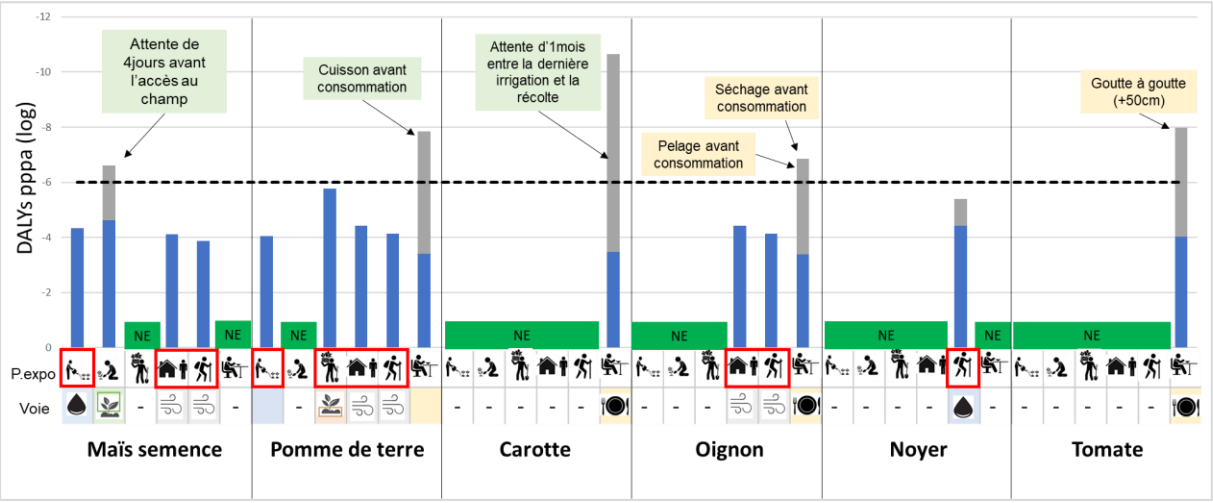
Au final, les objectifs liés à la santé sont atteints pour l'ensemble des populations exposées après les lagunes de maturation. Compte tenu des incertitudes associés aux paramètres d'exposition du personnel d'irrigation et des riverains et les passants, ces résultats sont à interpréter avec précaution. Néanmoins, ils indiquent l'intérêt du modèle pour évaluer la contribution des mesures *barrières* existantes et pour questionner l'intérêt de mettre en place une unité de traitement supplémentaire après les lagunes de maturation pour atteindre la qualité A. Nous reviendrons sur cet élément dans la troisième partie.

3.2.2.2 Résultats obtenus pour l'atelier de la Drôme

- **Analyse des résultats de l'évaluation des risques intégrant les mesures *barrières* existantes**

Contrairement à l'atelier de Clermont-Ferrand, les objectifs n'étaient pas atteints pour l'ensemble des micro-organismes pathogènes, et non pas uniquement pour norovirus. Cela peut s'expliquer par l'absence des lagunes de maturation. Compte tenu de l'erreur identifiée pour le modèle dose réponse de norovirus, il a été préféré de présenter un résumé des résultats associés à rotavirus. Ce microorganisme pathogène a également été choisi par rapport à campylobacter et cryptosporidium puisque les DALYs $_{pppa}$ associés étaient plus élevés (Figure 35). L'ensemble des résultats obtenus pour les populations exposées et les quatre micro-organismes pathogènes sont présentés Annexe 12 (p.263).

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés



Légende :

Personnel d'irrigation	Passants	Voie « Plante »	En bleu — Contribution de la station d'épuration	NE — Population non exposée
Personnel d'entretien	Consommateurs	Voie « Sol »	En orange — Contribution du traitement avancé	
Personnel de récolte	Voie « Eau »	Voie « Produit »	En gris — Contribution des mesures barrières existantes	Objectif de santé non atteint
Riverains	Voie « Air »	------ Objectif de santé à atteindre (≤10^{-6} DALYs pppa)	En vert clair — Mesures barrières « Pratiques culturales »	En jaune — Mesures barrières « Equipements »

Figure 35 : Résultats de la QMRA pour les risques associés à rotavirus pour l'atelier de la Drôme

Les résultats indiquent que la station d'épuration en place ne permet pas d'atteindre les objectifs sur la santé pour l'ensemble des populations exposées. Néanmoins, en considérant la contribution des mesures *barrières* existantes, les objectifs sur la santé sont atteints pour certaines populations exposées. C'est le cas, par exemple, de l'ensemble des consommateurs grâce au dépérissement naturel des micro-organismes pathogènes entre la dernière irrigation et la récolte et/ou grâce à l'utilisation de systèmes d'irrigation à faible pression ou localisés. Comme indiqué par un joueur, les consommateurs sont finalement protégés grâce à quelques mesures *barrières* :

[Tour 2, Etape 2] *« Il n'y a pas beaucoup de mesures barrières là au final ! » (participant non identifié)*

C'est un résultat intéressant puisque les eaux sont réutilisées en sortant d'une filière de traitement secondaire.

Comme pour l'atelier de Clermont-Ferrand, des risques persistent pour les riverains et les passants pour les parcelles en aspersion et en micro-aspersion ainsi que pour le personnel d'irrigation des cultures où les joueurs avaient considéré leur exposition (maïs semence et pomme de terre).

- **Remise en question de la contribution de certaines mesures *barrières* par les joueurs**

La contribution de certaines mesures *barrières* a été questionnée par les joueurs. C'est le cas notamment du dépérissement naturel entre la dernière irrigation et l'intervention du personnel manuel pour la castration du maïs semence. Cette mesure *barrière* avait été identifiée avec les acteurs de Clermont-Ferrand lors de la co-construction de l'outil. Pour rappel, les terres argileuses de la Limagne Noire nécessitent l'attente d'un temps de séchage pour le passage des machines. Le passage

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

mécanique dure ensuite deux jours, ce qui permet un temps d'au moins quatre joueurs entre la dernière irrigation et l'intervention du personnel en charge de la castration manuelle. Un des joueurs de l'atelier de la Drôme a indiqué que cette attente n'était pas nécessairement appliquée dans son contexte :

> [Tour 2, étape 2] *« Le quatre jours pour la parcelle 1 il est tendu. C'est compliqué d'avoir du maïs où on n'y rentre pas tous les jours. Surtout la floraison, y'a vraiment besoin de surveiller. On ne sait pas ce qui se passe 48h avant. On ne sait jamais quand c'est la castration, ça dépend du climat. Ça se peut que l'irrigation soit le matin et on adapte » (rôle « collectivité », participant agriculteur/SIID, DR)*

Les pratiques culturales et d'irrigation, et donc l'application de certaines mesures *barrières*, varient donc selon les contextes. La présence de l'agriculteur parmi les joueurs a contribué à mettre en lumière cet spécificité.

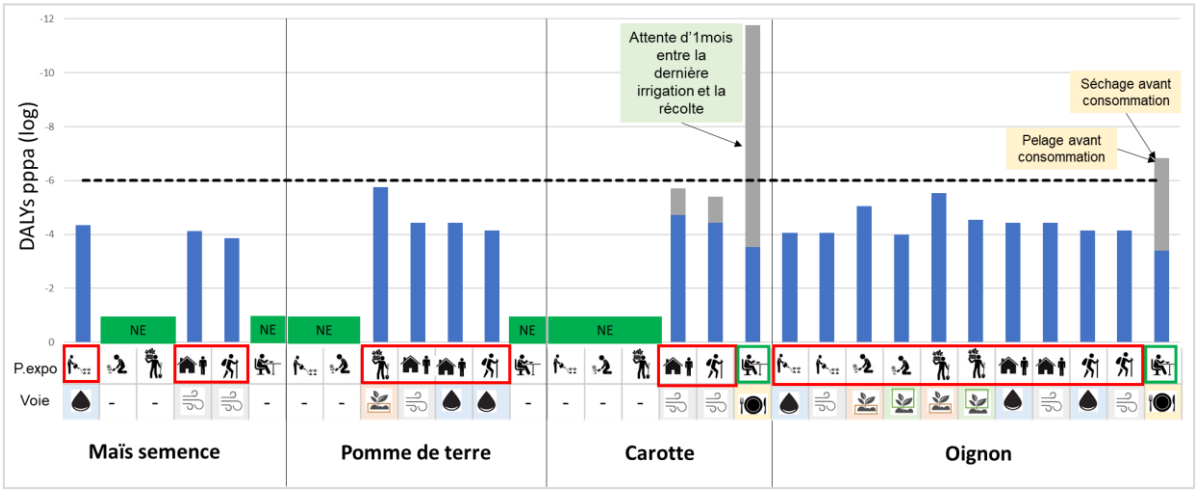
Comme pour l'atelier de Clermont-Ferrand, les joueurs se sont interrogés sur la contribution des préparations post-récolte. Une contamination du consommateur peut survenir, non pas lors de l'ingestion du produit final, mais plutôt lors du contact cutané avec le produit final :

> [Tour 2, étape 2] *« Le risque on s'était dit que c'était par rapport au contact avec la peau, pas vraiment le fait de manger » (rôle « agriculteur – pomme de terre », participant de SUEZ, DR)*

Néanmoins, cette remarque n'a pas été faite pour d'autres cultures alimentaires. La présence de mesures *barrières* pour les autres cultures alimentaires (séchage et pelage pour l'oignon, dépérissement pour la carotte) pourrait expliquer ce constat.

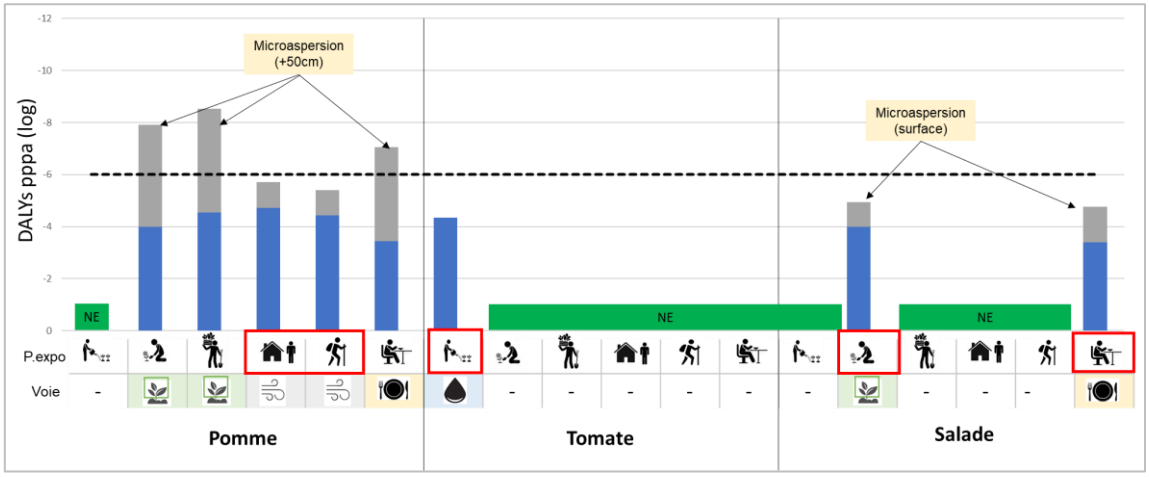
3.2.2.3 Résultats obtenus pour l'atelier de Porquerolles

La Figure 36 (1 et 2) présente les résultats obtenus pour les risques associés à rotavirus obtenus pendant cet atelier. L'ensemble des résultats obtenus pour les populations exposées et les quatre micro-organismes pathogènes est présenté en Annexe 13.



(1)

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés



(2)

Légende :

Personnel d'irrigation	*Passants*	*Voie « Plante »*	*En bleu*	*Contribution de la station d'épuration*	NE *Population non exposée*
Personnel d'entretien	*Consommateurs*	*Voie « Sol »*	*En orange*	*Contribution du traitement avancé*	
Personnel de récolte	*Voie « Eau »*	*Voie « Produit »*	*En gris*	*Contribution des mesures barrières existantes*	*Objectif de santé non atteint*
Riverains	*Voie « Air »*	------ *Objectif de santé à atteindre (≤10^{-6} DALYs pppa)*	*En vert clair*	*Mesures barrières « Pratiques culturales »*	*En jaune* *Mesures barrières « Equipements »*

Figure 36 : Résultats de la QMRA pour les risques associés à rotavirus pour l'atelier de Porquerolles (1 et 2)

Les résultats sont assez similaires que les autres ateliers concernant la contribution de la filière de traitement et des mesures barrières post-traitement. Les résultats diffèrent néanmoins de ceux de l'atelier de la Drôme par rapport aux populations exposées pour lesquels des risques persistent. Par exemple, lors de l'atelier de la Drôme, il a été considéré que la mécanisation des étapes d'entretien et de récolte de l'oignon contribue à empêcher l'exposition du personnel intervenant lors de ces étapes. Lors de l'atelier de Porquerolles, ces populations ont été considérées comme exposées. Les résultats de la QMRA montrent que des risques persistent et que des mesures barrières doivent être mises en place. Ainsi, les conclusions des joueurs concernant l'évaluation des risques vont dépendre des scénarios d'exposition initialement construits. Les résultats seront donc différents selon les décisions des joueurs, apportant un caractère subjectif aux résultats produits. Nous reviendrons sur cet élément dans la deuxième partie.

Lors de cet atelier, les mesures *barrières* déjà mises en place indiquées sur les fiches « joueurs » ainsi que les contributions attribuées ont été peu discutées. L'absence de certains acteurs comme ceux liés au domaine du sanitaire ou bien des acteurs scientifiques pourrait éventuellement être une des raisons. Néanmoins, en l'absence d'autres ateliers menés à Porquerolles, cette hypothèse ne peut pas être vérifiée.

3.2.3 Un apport d'informations pour définir les mesures barrières supplémentaires (Etape 3)

Nous allons maintenant nous intéresser aux résultats obtenus lors de la dernière étape de construction du scénario *multi-barrières.* Comme indiqué précédemment, les objectifs liés à la santé ne sont pas

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

atteints pour l'ensemble des populations exposées. Les joueurs réfléchissent alors, parfois collectivement et/ou parfois individuellement, aux mesures *barrières* supplémentaires.

Comme pour l'étape précédente, les discussions se sont déroulées dans un temps restreint, ce qui a pu limiter les discussions entre les joueurs. Néanmoins, les discussions ont apporté différentes informations sur les mesures *barrières.* Les résultats pour chaque atelier vont être présentés successivement.

3.2.3.1 Résultats obtenus pour l'atelier de Clermont-Ferrand

La Figure 37 présente les mesures supplémentaires retenues par les joueurs.

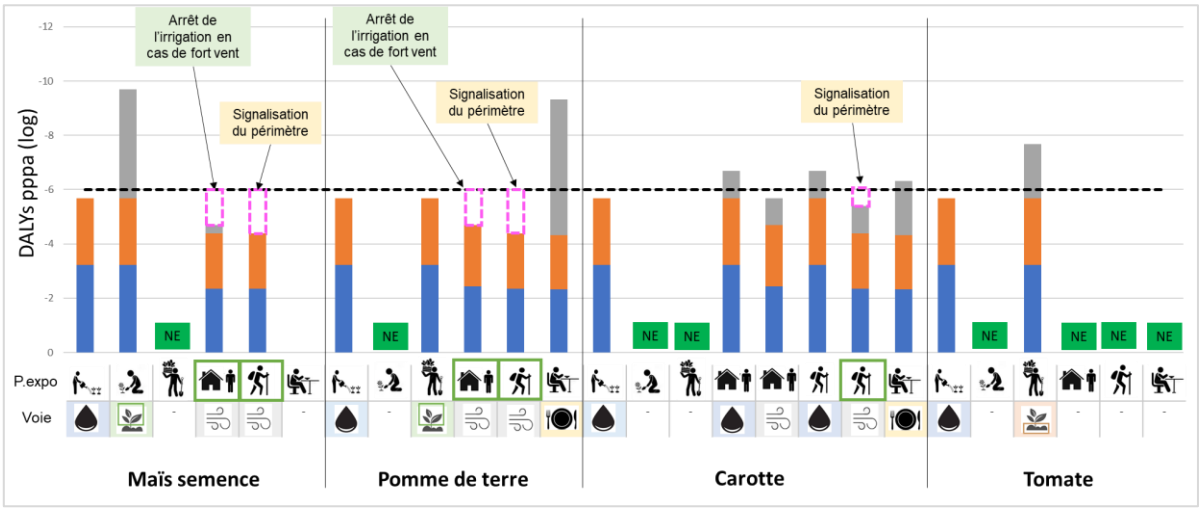


Figure 37 : Mesures de gestion supplémentaires définies pour l'atelier de Clermont-Ferrand

Légende :

Personnel d'irrigation	*Passants*	*Voie « Plante »*	*En bleu* — *Contribution de la station d'épuration*	*En jaune* — *Mesures barrières « Equipements »*
Personnel d'entretien	*Consommateurs*	*Voie « Sol »*	*En orange* — *Contribution du traitement avancé*	*NE* — *Population non exposée*
Personnel de récolte	*Voie « Eau »*	*Voie « Produit »*	*En gris* — *Contribution des mesures barrières existantes*	*Objectif de santé non atteint*
Riverains	*Voie « Air »*	------ *Objectif de santé à atteindre (≤10^{-6} DALYs pppa)*	*En vert clair* — *Mesures barrières « Pratiques culturales »*	*En rose* — *Contribution des mesures supplémentaires*

Les mesures supplémentaires indiquées en pointillée correspondent aux mesures dont la contribution repose sur la responsabilité individuelle. Nous allons aborder cet élément plus en détail dans cette section.

- **Atteinte des objectifs pour les riverains et les passants**

La mise en place de panneaux de signalisation a été envisagée pour réduire l'exposition des riverains et des passants des parcelles irriguées en aspersion (maïs semence et pomme de terre). Pour le participant de la CAM, cette mesure semble intéressante compte tenu des faibles coûts associés et de la simplicité de mise en œuvre. De plus, elle couvre la responsabilité de l'agriculteur :

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

[Tour 2, étape 3] *« Du moment que vous avertissez du risque, ça vous dédouane. (…) Vous mettez un petit panneau avec la flèche la personne était censée savoir. La signalétique c'est ce qui couvre le mieux » (rôle « collectivité », participant de la CAM, CF)*

La contribution de cette mesure ne fait néanmoins pas consensus entre les joueurs. Concernant sa contribution à la réduction des risques, aucune réduction log n'est indiquée aux joueurs puisque cette réduction n'est pas estimable (NRMMC *et al.,* 2006) (voir Chapitre 1). Les joueurs doivent donc décider de la contribution de cette mesure. Pour certains, elle permettrait d'empêcher l'exposition des passants. Sa contribution sera toutefois effective si ces derniers respectent les indications (Figure 37, *en pointillé*).

Pour le participant de l'ARS, l'absence de responsabilité des agriculteurs lors de la mise de panneaux est discutable. Néanmoins, il est important de prendre en compte la fréquence de passage dans l'évaluation des risques pour évaluer la pertinence de mettre en place cette mesure :

[Tour 2, étape 3] *« La signalétique c'est une chose mais faut évaluer la fréquence de passage. Si vous êtes sur un chemin de randonnée, par exemple, ce n'est pas la même chose que si vous êtes sur un chemin agricole où personne ne passe. Je pense que ça passe aussi avant de parler signalétique. Je pense qu'il faut quand même évaluer le risque par la fréquence de passage, par l'usage du chemin en fait. Pour le coup, le risque est minime ou au contraire… » (rôle « agriculteur – pomme de terre », participant de l'ARS n°1, CF)*

Ainsi, la mise en place de cette mesure est à évaluer selon le contexte. Pour la personne de l'Université, la mise en place de panneaux de signalisation pourrait néanmoins contribuer à sensibiliser le public aux risques associés à la pratique :

[Tour 2] *« Informer les habitants de la commune de ces pratiques. Pour qu'il y ait une culture générale qui se crée au sein de la communauté et que, spontanément, les habitants n'aillent pas se promener sur ce type de chemin s'il voit un dispositif d'irrigation en fonctionnement » (rôle « agriculteur - carotte », participant de l'Univ. de CF, CF)*

Il est intéressant de voir que la sensibilisation suggérée par ce joueur porte sur les risques associés à la pratique et non les bénéfices associés.

D'autres mesures pourraient être envisagées pour réduire les risques des riverains et des passants comme, par exemple, le changement des systèmes d'irrigation. Néanmoins, le participant membre de l'ASA LN souligne que cette mesure représente des contraintes opérationnelles non-négligeables. Concernant la mise en place de distance entre le périmètre irrigué et les zones sensibles (habitations, chemins de passage…), cette mesure ne semble pas envisageable pour le participant de la DDT incarnant le joueur cultivant du maïs semence :

[Tour 2, étape 3] « *La mise en place d'une distance c'est jouable ? » (rôle « agriculteur - tomate » participant de l'AE LB, CF)*
« Tu veux une distance de sécurité encore ? Alors que j'ai déjà mes bandes enherbées, mes zones de retirement etc.. Il faut voir ce qu'on nous demande ! » (rôle « agriculteur – maïs semence », participant de la DDT n°1, CF)

Ce joueur indique que la REUT représenterait alors des contraintes supplémentaires pour des acteurs déjà soumis à un ensemble de contraintes par rapport à d'autres enjeux associés à l'agriculture. Au-delà de l'ajout de contraintes que cela semble représenter, il est également indiqué que les distances imposées ne sont généralement tenables pour les agriculteurs :

[Tour 2, étape 3] **«** *On peut modéliser la dispersion des aérosols particules au niveau des champs, mais on arrive sur des contraintes pour les agriculteurs qui sont pas tenables. » (rôle « agriculteur - carotte », participant de l'Univ. de CF, CF)*

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

L'arrêt de l'irrigation en cas de fort vent peut contribuer à limiter les risques de dérive associés aux systèmes d'irrigation par aspersion. Pour certains, elle relève « du bon sens » *(rôle « agriculteur - carotte », participant de l'Univ. de CF, CF).* Comme pour les panneaux de signalisation, aucune réduction log n'a été attribuée. Sa mise en place effective repose sur la responsabilité individuelle de l'agriculteur (Figure 37, *en pointillé*). Cette mesure *barrière* pourrait être complétée par la mise en place d'écrans de protection *(rôle « agriculteur – maïs semence », participant de la DDT n°1, CF).*

- **Atteinte des objectifs pour le personnel en charge de l'irrigation**

Si des mesures supplémentaires ont été réfléchies pour les riverains et les passants, aucune mesure n'a été indiquée pour réduire les DALYS $_{pppa}$ pour le personnel d'irrigation dont les objectifs liés à la santé n'étaient pas atteints. Le manque de temps peut être une des raisons pouvant expliquant ce résultat, néanmoins le sujet n'a pas été abordé.

3.2.3.2 Résultats obtenus pour l'atelier de la Drôme

La Figure 38 présente les mesures supplémentaires envisagées par les joueurs.

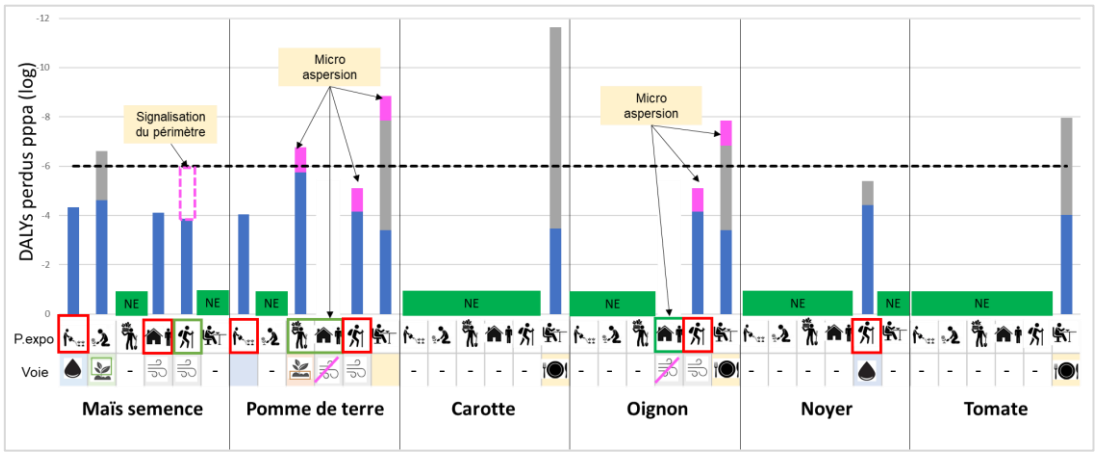


Figure 38 : Mesures de gestion supplémentaires définies pour l'atelier de la Drôme

Légende :

	Personnel d'irrigation		*Passants*		*Voie « Plante »*	*En bleu*	*Contribution de la station d'épuration*	*En jaune*	*Mesures barrières « Equipements »*
	Personnel d'entretien		*Consommateurs*		*Voie « Sol »*	*En orange*	*Contribution du traitement avancé*	*NE*	*Population non exposée*
	Personnel de récolte		*Voie « Eau »*		*Voie « Produit »*	*En gris*	*Contribution des mesures barrières existantes*		*Objectif de santé non atteint*
	Riverains		*Voie « Air »*	------	*Objectif de santé à atteindre (≤10^{-6} DALYs pppa)*	*En vert clair*	*Mesures barrières « Pratiques culturales »*	*En rose*	*Contribution des mesures supplémentaires*

- **Réduction des risques pour les riverains et les passants**

Le changement des systèmes d'irrigation par aspersion pour des systèmes fonctionnant à plus faible pression ou qui localisent l'irrigation au pied de la plante a été envisagé pour réduire les risques des riverains et des passants. Par exemple, la mise en place d'un système en micro-aspersion a été retenue pour les parcelles « pomme de terre » et « oignon ». Cette mesure contribue également à apporter une gestion supplémentaire des risques pour les consommateurs dont les objectifs liés à la santé

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

étaient déjà atteints. La mise en place d'un système en micro-aspersion représente 8 200 €/ha (en intégrant les coûts de renouvellement). Ainsi, pour le joueur cultivant 7,5 ha de pomme de terre, cela représente un investissement de 61 500€. Pour le joueur cultivant 2,5 ha d'oignon, cela représente un investissement de 20 500€. Lors de la construction du scénario 1, la mise en place d'une unité de traitement « Filtre à sable + UV » représentait un coût d'investissement pour les six joueurs de la Drôme d'environ 50 000€. Ainsi, les coûts sont plus élevés pour le deuxième scénario pour le joueur cultivant de la pomme de terre mais moins élevés pour le joueur cultivant de l'oignon. Les coûts associés au changement de système d'irrigation ont été perçus comme trop important par le joueur cultivant du maïs semence *(participant du SMRD, DR).*

Si la micro-aspersion contribue à empêcher l'exposition des riverains, des risques persistent pour les passants. Restreindre l'accès aux chemins situés à proximité du périmètre semble peu envisageable. Cela irait contre la liberté de circuler ce qui paraît peu réaliste pour le participant du SMRD (*rôle « agriculteur – maïs semence »).* Ce positionnement est partagé par la personne de l'ARS *(rôle « agriculteur – tomate »)*. Comme pour l'atelier de Clermont-Ferrand, la mise en place de panneaux de signalisation semble être une solution intéressante et pour des coûts peu élevés. Néanmoins, elle semble également être la moins efficace :

> [Tour 2, étape 3] *« La moins chère mais la moins fonctionnelle, je vais mettre un panneau pour les passants » (rôle « agriculteur – noyer », participant de la DDT n°4, DR)*

Cet avis a été partagé par un autre participant qui indique que des enfants qui ne savent pas lire pourrait difficilement respecter cette mesure *(rôle « collectivité », participant agriculteur/SIID, DR).* Cette mesure a également suscité des réactions quant au message que cela passerait sur la REUT :

> [Tour 2, étape 3] *« Un panneau de chaque côté avec écrit « irrigation avec de l'eau contaminée » (rôle « agriculteur – pomme de terre », participant de la DDT n°3, DR)*
> *« ou danger » (participant non identifié)*
> *« radioactif » (rôle « agriculteur – tomate », participant de l'ARS n°2, DR)*

Nous retrouvons les questionnements identifiés dans la littérature (chapitre 1). Il est intéressant de voir que la perception de cette mesure varie selon les joueurs.

- **Réduction des risques pour le personnel d'entretien et de récolte**

Au-delà du changement du système d'irrigation, le participant de la DDT (n°3) a envisagé la mise en place d'un temps entre la dernière irrigation et la récolte pour réduire les risques pour le personnel de récolte intervenant pour la finalisation de la récolte de la pomme de terre. En effet, un dépérissement naturel pourrait avoir lieu. Néanmoins, un des agriculteurs présents a indiqué que les pommes de terre sont souvent irriguées juste avant la récolte afin qu'une couche de terre se forme pour les protéger. Cette mesure *barrière* est donc difficilement envisageable dans le cas de cette culture :

> [Tour 2, étape 3] *« Si on n'arrose pas un jour avant la récolte c'est possible ? Y'aurait une perte de rendement ? » (rôle « agriculteur – pomme de terre », participant de la DDT n°3, DR)*
> *« Ah non, ce n'est pas du rendement, c'est techniquement. C'est pour que ça ne soit pas trop sec, pour ne pas arracher les mottes de terre qui vont casser les pommes de terre » (rôle « collectivité », participant agriculteur/SIID, DR)*

Ainsi, la mise en place d'un dépérissement naturel n'est donc pas toujours envisageable. Cela confirme également l'intérêt d'intégrer les agriculteurs dans les discussions pour identifier la possibilité de la mise en place de cette mesure.

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

- **Réduction des risques pour les consommateurs**

Les consommateurs sont, dans l'ensemble, bien protégés par les mesures existantes. La mise en place de préparations post-récolte supplémentaire avant distribution a néanmoins été envisagée pour assurer une réduction suffisante des risques. C'est le cas, par exemple, du pelage des oignons avant distribution *(rôle « agriculteur – oignon », participant de la CCVD, DR).*

Différentes informations ont été apportées sur les préparations post-récolte. Par exemple, la désinfection des produits semble difficilement envisageable pour certaines cultures :

[Tour 2, Etape 3] *« La désinfection pour les tomates cerises bon courage » (participant non identifié)*

Un échange au sujet du séchage a soulevé des interrogations concernant la contribution de la mesure *barrière* « séchage des produits » :

[Tour 2, Etape 3] *« Ça chauffe quand même dans les chauffoirs, c'est chauffé à quelle température ? » (rôle « collectivité », participant de la Chambre d'A. n°2, DR)*
Les séchoirs c'est à 20°C même pas » (rôle « collectivité », participant agriculteur/SIID, DR)

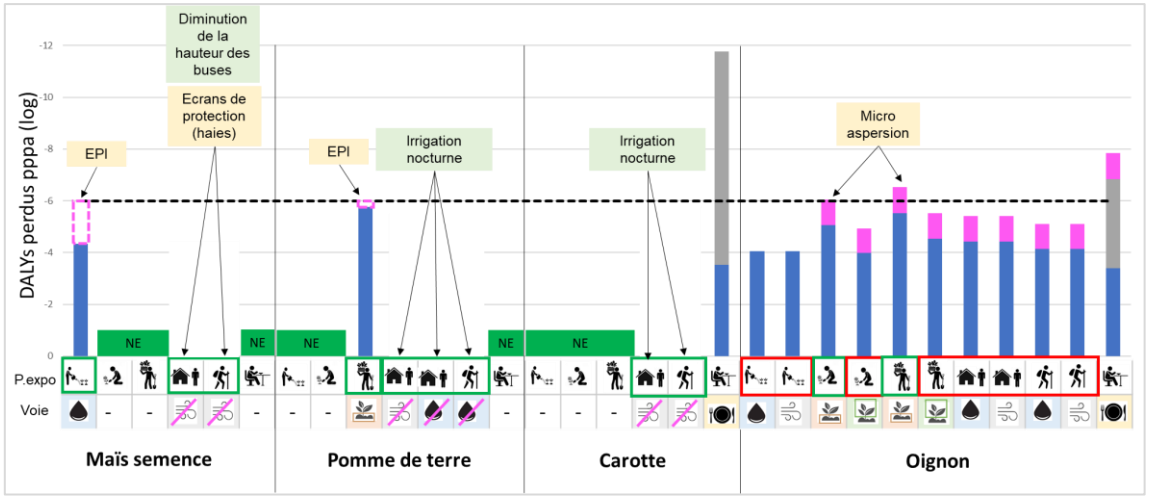
En effet, les températures indiquées par la littérature pour inactiver les micro-organismes pathogènes sont aux alentours de 70°C (cf. Chapitre 1, section 1.3.4.4). Une température de 20°C semble donc assez faible pour considérer une inactivation. Ce point serait à approfondir.

- **Réduction des risques pour le personnel d'irrigation**

Comme pour l'atelier de Clermont-Ferrand, aucune mesure n'a été indiquée pour réduire les risques pour le personnel d'irrigation de la parcelle « maïs semence » et « pomme de terre ». Pour les autres parcelles, ces populations n'étaient pas considérées comme exposées.

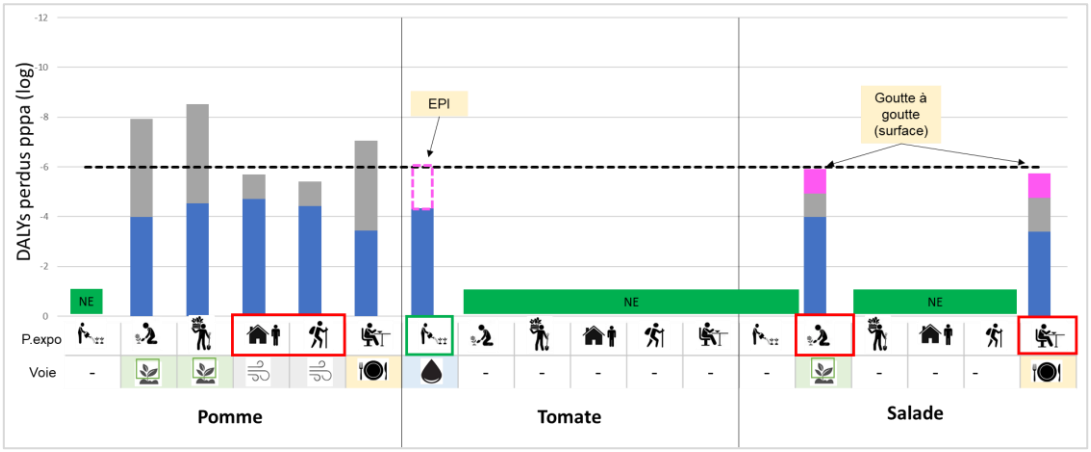
3.2.3.3 Résultats obtenus pour l'atelier de Porquerolles

La Figure 39 présente les mesures supplémentaires envisagées par les joueurs.



(1)

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés



(2)

Figure 39 : Mesures de gestion supplémentaires définies pour l'atelier de Porquerolles (1 et 2)

Au final, des mesures similaires aux deux ateliers précédent ont été envisagées comme la micro-aspersion. Les échanges concernant les mesures *barrières* supplémentaires se sont déroulés dans un temps très restreint pour cet atelier (< 15minutes). Néanmoins, les échanges ont permis d'identifier des informations intéressantes au sujet d'autres mesures qui n'ont pas nécessairement été abordées dans les autres ateliers. L'exposition du personnel agricole a été plus amplement discutée lors de cet atelier, contrairement aux deux autres. La présence d'une majorité d'acteurs opérationnels pourrait être une des raisons expliquant ce résultat.

- **Réduction des risques pour les professionnels**

Le port d'EPI a été indiqué par plusieurs joueurs pour réduire les risques du personnel d'irrigation, d'entretien et de récolte. Il était indiqué sur les cartes *barrières* que la contribution est « non quantifiable mais importante ». En effet, comme indiqué dans les directives de l'OMS et australienne, aucune réduction log ne peut être attribuée pour cette mesure. Néanmoins, la contribution des EPI est attendue comme importante (voir Chapitre 1). La contribution nécessite toutefois d'être définie avec les acteurs concernés et notamment les agriculteurs.

Pour un des participants membre du PNPC, la contribution des EPI semble assez limitée, en particulier lors de l'entretien du réseau où des projections d'EUT peuvent avoir lieu :

> [Tour 2, étape 3] *« T'as déjà entretenu un réseau d'irrigation ? t'es mouillé de là - jusque-là donc tes gants tout seul…à partir du moment où t'as de la pression, t'as de l'eau qui gicle partout. Mais avoir une combinaison complète en plein été… je préfère prendre la flotte, une bonne douche derrière. C'est difficile les EPI. » (rôle « agriculteur – maïs semence », participant de l'ASDFV n°1, PQ)*

Le port d'EPI semble également difficile en particulier lors des périodes estivales. Cette perception fait écho aux résultats de littérature que nous avions présenté lors du chapitre 2. Il est intéressant de voir que les attitudes de ce joueur vis-à-vis des EPI ont varié au cours de l'atelier. Au début de la construction du scénario *multi-barrières*, les EPI ont été indiqués par ce joueur comme mesure à mettre en place compte tenu de l'absence d'un traitement supplémentaire :

> [Tour 2, étape 3] *« Vu qu'on ne met pas en place un traitement pour améliorer la qualité de l'eau, il faut qu'on travaille sur les EPI. Au moins des gants et quelque chose d'imperméable. » (rôle « agriculteur – maïs semence », participant de l'ASDFV n°1, PQ)*

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

A la fin du processus de construction, leur mise en œuvre semble moins envisageable en particulier lors des périodes estivales (cf propos présentés dans le paragraphe précédent). Au final, le port d'EPI pourrait être envisagé sur la mise en route du réseau :

> [Tour 2, étape 3] *« Non mais on peut mettre des EPI, éventuellement sur la mise en route du réseau car on n'est pas en grande chaleur. Mais sur la maintenance en cas de pannes (…) Après, on peut préconiser les EPI, on peut le marquer. Tout le monde est content » (rôle « agriculteur – maïs semence », participant de l'ASDFV n°1, PQ)*

Les propos de ce joueur indiquent l'identification d'un compromis. Une autre possibilité a également été proposée par ce joueur : la possibilité de prendre une douche à la fin de l'intervention sur le périmètre irrigué :

> [Tour 2, étape 3] *« Ou alors avoir une douche comme, normalement, tous les locaux agricoles avec les produits phyto. Une douche de fin de service. » (rôle « agriculteur – maïs semence », participant de l'ASDFV n°1, PQ)*

Un des objectifs des porteurs de projet associés à cet atelier était de pouvoir aborder la gestion des risques avec les acteurs opérationnels et notamment le port d'EPI. Cet objectif semble avoir été rempli. Ce résultat indique également l'intérêt d'intégrer les acteurs opérationnels pour aborder le sujet de leur propre protection vis-à-vis des risques associés à la REUT et des mesures envisageables à leur échelle.

- **Réduction des risques pour les riverains et les passants**

Comme pour les deux autres ateliers, le changement des systèmes d'irrigation pour des systèmes fonctionnant à plus faible pression ou qui localisent l'irrigation au pied de la plante a été envisagé pour réduire les risques des riverains et des passants. L'irrigation nocturne a été proposée. Cette mesure semble simple à mettre en place. C'est également une obligation qui a été mise en place par certains arrêtés sécheresse. Néanmoins, un participant membre de l'ASDFV a indiqué qu'il n'était pas possible d'irriguer l'ensemble du périmètre uniquement la nuit compte tenu des capacités des réseaux de distribution :

> [Tour 2, étape 3] *« Irriguer la nuit c'est le plus simple. » (rôle « agriculteur – carotte», participant du PNPC n°3, PQ)*
> *« C'est même une obligation, quand y'a des arrêtés sécheresse. » (rôle « agriculteur – salade », participant de la DDTM, PQ)*
> *« Mais je peux pas tout irriguer la nuit. » (rôle « agriculteur – salade », participant de l'ASDFV n°3, PQ)*

En effet, la distribution des EUT est organisée selon des tours d'eau qui ne permettent pas de tout irriguer la nuit. La mise en œuvre de cette mesure dépend donc de l'organisation du réseau et de sa capacité. Cet élément avait également été abordé lors des ateliers de co-construction avec les acteurs de Clermont-Ferrand. Au-delà de la capacité du réseau, l'irrigation nocturne peut allonger le temps de travail de l'agriculteur. En effet, malgré l'automatisation des équipements, une surveillance est tout de même nécessaire. De plus, certains systèmes comme les canons sur enrouleurs nécessitent d'être déplacés.

Un autre membre de l'ASDFV a proposé une mesure qui n'était pas indiquée dans l'outil :

> [Tour 2, étape 3] *« Redescendre les buses d'aspersion, avoir des descentes beaucoup plus longues, quasiment au raz de la culture, ça évitera la dérive. Redescendre à 2m au lieu de 6m » (rôle « agriculteur – maïs semence », participant de l'ASDFV n°1, PQ)*

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

Cette mesure fait écho à la mesure indiquée par les directives australiennes concernant l'orientation des buses contribuant à réduire de 1 log les risques de dispersion (NRMMC *et al.,* 2006). Même si les systèmes d'irrigation par aspersion ne sont pas utilisés à Porquerolles, ce résultat indique néanmoins l'apport d'une nouvelle mesure par un participant et donc la proposition d'une nouvelle possibilité.

3.2.4 Conclusion sur les apports de la construction collective du scénario « approche multi-barrières »

Le processus de construction de ce scénario n'a également pas pu aboutir compte tenu des discussions suscitées. Ce deuxième tour a permis de mettre en lumière l'existence d'un certain nombre de mesures *barrières* au-delà du traitement à travers les pratiques culturales ou les équipements utilisés. Certaines mesures *barrières* contribuent à empêcher l'exposition des populations exposées. D'autres agissent sur la dose d'exposition en réduisant la concentration en microorganismes pathogènes présente sur les différents vecteurs d'exposition ou en réduisant le volume d'exposition. La construction collective de ce scénario permet de faire émerger des informations du terrain concernant les mesures *barrières* et leur mise en œuvre. Les informations indiquées aux joueurs à travers les supports de l'outil sont ainsi collectivement discutées, complétées par des informations apportées par les participants et parfois remises en question. Les informations apportées par les acteurs opérationnels, notamment liés au domaine agricole, concernant les mesures *barrières* et leur mise en œuvre confirment l'intérêt de les associer au processus de construction des scénarios de gestion. Enfin, la construction collective a mis en lumière le besoin de mieux caractériser la contribution de certaines mesures *barrières* notamment celles reposant sur la responsabilité individuelle (panneaux de signalisation, port d'EPI…).

Nous verrons dans la quatrième partie que la construction collective de ce scénario a permis de montrer une approche de gestion des risques. Nous allons d'abord nous intéresser au modèle d'évaluation des risques (QMRA) et notamment à l'identification collective des risques nécessaire pour réaliser l'évaluation. Nous verrons également la contribution du modèle QMRA pour mettre en lumière la contribution des mesures *barrières*.

3.3 Une confrontation des représentations sur les risques et l'apport d'une autre approche pour évaluer les risques

L'état de l'art, présenté dans le chapitre 2, a permis de souligner l'importance de ne pas négliger l'influence de la perception des risques dans la construction de la gestion des risques, sa mise en œuvre opérationnelle et plus largement dans la compréhension et l'acceptation des projets de REUT. Nous verrons, dans un premier temps, que l'analyse *ex ante* a confirmé les résultats de la littérature concernant une certaine hétérogénéité des perceptions entre les différentes parties prenantes. Dans un second temps, nous verrons que cette hétérogénéité a émergé pendant l'atelier notamment lors de l'identification collective des risques. Cette étape a également permis de montrer l'importance de réaliser cette identification en intégrant différentes parties prenantes de la filière de REUT pour confronter les représentations et apporter différentes informations.

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

3.3.1 Une analyse ex ante qui confirme une perception des risques parfois hétérogène et pas toujours prévisible et indiquant un besoin d'informations

- **Une perception de la REUT comme une pratique pouvant représenter des risques ?**

Lors de l'évaluation *ex ante,* nous avons évalué la perception des risques des participants à travers leur positionnement vis à vis d'une affirmation indiquant que « *la REUT est une pratique qui peut représenter des risques pour la santé humaine et animale* » (Figure 40).

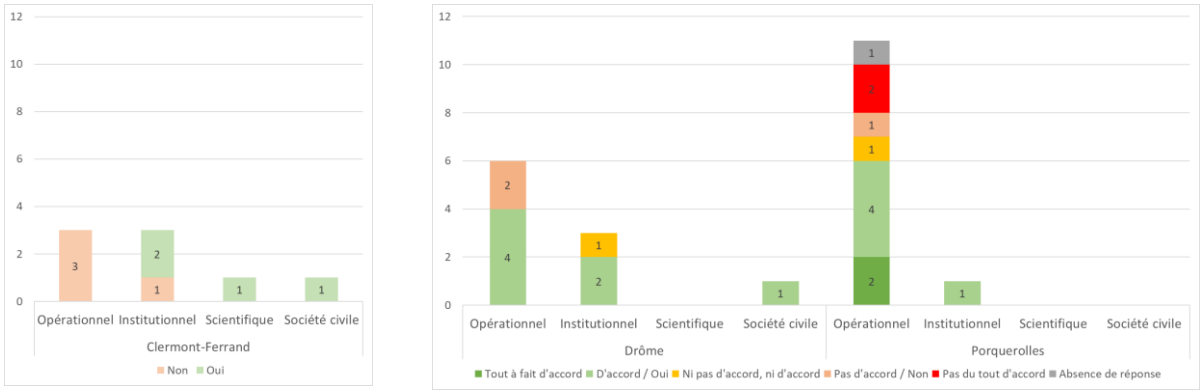


Figure 40 : Analyse ex ante de la perception des participants des trois ateliers sur la REUT comme étant une pratique pouvant représenter des risques

Avant de présenter plus en détail cette figure, il est important d'indiquer que les résultats obtenus peuvent présenter certaines limites méthodologiques. Tout d'abord, notre affirmation a été exprimée au conditionnel, ce qui a pu amener certains interrogés à exprimer leur perception sur les risques potentiels associés à la pratique plutôt que sur les risques effectifs. L'échelle de Likert utilisée pour cette question a été la même pour les trois ateliers. Néanmoins, les participants de l'atelier de Clermont-Ferrand ont été interrogés à l'oral, contrairement aux participants des ateliers de la Drôme et de Porquerolles, et n'ont pas toujours répondu selon l'échelle proposée. Pour éviter une interprétation faussée des résultats, les réponses ont donc été classées selon une échelle simplifiée (« Oui » et « Non ») en fonction des justifications apportées par les participants. Cet élément explique la séparation des résultats en deux graphiques. Les réponses situées aux extrêmes de l'échelle n'ont donc pas pu être identifiées ainsi que les réponses neutres pour les participants de Clermont-Ferrand. Néanmoins, les explications associées aux réponses apportées par les participants ont fourni des éléments complémentaires pour appuyer notre analyse.

Pour les trois ateliers, 18 participants sur 30 (60%) ont indiqué une réponse favorable à l'affirmation. Le nombre bien inférieur de participants de certaines catégories, comme les acteurs scientifiques et de la société civile, ne permet pas une comparaison entre les catégories. Néanmoins, les résultats montrent une certaine hétérogénéité entre les parties prenantes confirmant ainsi les résultats de la littérature identifiée lors de l'état de l'art (Hartley, 2006 ; Baggett *et al.,* 2006 ; Goodwin *et al.,* 2019) (Chapitre 2). Cette hétérogénéité est également observée au sein d'une même catégorie comme l'indiquent les résultats de l'atelier de Porquerolles pour les acteurs opérationnels. De plus, chez les huit participants liés au domaine agricole pour les trois ateliers confondus, quatre ont indiqué une réponse défavorable à l'affirmation et quatre ont indiqué une réponse favorable. Cela rejoint les résultats de Keraita *et al.* (2008) qui indiquent que la perception des risques est hétérogène chez les agriculteurs. Chez les participants institutionnels, la majorité des réponses (cinq participants sur sept) indiquent plutôt vers une réponse favorable vis-à-vis de notre affirmation. Le nombre de réponses obtenues est plus faible que chez les acteurs opérationnels, néanmoins une tendance à une réponse favorable peut être identifiée.

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

Nous allons nous intéresser aux justifications apportées par les participants. Quelques exemples sont présentés dans le Tableau 30. A travers ces réponses, nous avons tenté d'identifier les facteurs pouvant influencer les interrogés.

Avis	Risques	Mesures	Réglementation	Autres parties prenantes
Pas du tout d'accord	*Retour d'expérience : « Je ne suis pas d'accord dans ce cas car **cela pourrait avoir un effet dangereux** sur les animaux et les humains » (participant du PNPC n°4, PQ)*			
Pas d'accord	*Degré de connaissances : « Je ne m'étais **jamais posé la question** ! (participant agriculteur de l'ASA LN, CF)* *Identification des risques : Si pollution il y a elle sera détectée et donc traitée si elles sont réutilisées plutôt que rejetées dans le milieu naturel » (participant de la C3PS, DR)* *Eau de surface : « On se pose beaucoup **moins de questions quand on vient pomper un mètre après le rejet** de la STEP » (participant de la CAM, CF)* *Eau de surface : « On gère **l'irrigation sans trop se poser de question**. Je pense que la REUT à mon avis, il n'y a pas de souci. Par rapport à ce qu'on a aujourd'hui, j'avoue que **ça ne peut qu'aller mieux** » (participant de la DDT n°2, CF)*	*Bonnes pratiques : « Non si le **suivi est sérieux**, d'analyses régulières y'a pas de raison d'avoir des contraintes. **Des pratiques adaptées**. le risque est très limité » (participant de la Chambre d'A. n°2, DR)* *Mesures existantes : « Si on prend l'ASA, le niveau de désinfection qu'ils ont, qu'une bactérie pathogène réussisse à passer tout le système, que la personne se trouve pile poil, au bon endroit au bon moment, au moment de l'aspersion, vous **cumulez une quantité de probabilité**s qui ne sont pas improbables mais qui sont **très faibles** (…) je pense qu'on **joue à se faire peur** » (participant de la CAM, CF)*	*Existence d'une réglementation : « La REUT est actuellement très **encadrée réglementairement**. Les usages sont fonction des classes de qualité respectées » (participant de MTPM n°1, PQ)*	*Confiance envers les gestionnaires : Cela fait des années et y'a jamais eu de problème, Christophe (nb : le Président de l'ASA) il est sérieux » (participant agriculteur de l'ASA LN, CF)*
Ni pas d'accord, ni d'accord	*Degré de connaissances : « Je **n'ai aucune notion** des risques potentiels » (participant de l'ASDFV n°1, PQ)*		*Bonnes pratiques : « Nous pouvons réutiliser les EUT du moment que la **qualité définie** pour l'utilisation est **respectée** » (participant de la DDT n°3, DR)*	
D'accord	*Usages : « Si vous faites de de l'irrigation sur les **légumes en maraîchage**, là le risque il est connu. Là pour le coup**, il est au max** » (participant de l'ARS n°1, CF)* *Degré de connaissances : « Je suis **profane** dans le domaine mais tout dépend ce qu'on irrigue et comment on traite ces produits après (…) **Une position intermédiaire** me semble pas mal » (participant de la FRANE, CF)* *Degré de connaissances « **Je connais les risques sanitaire** liés aux eaux usées traitées, notamment microbiologiques » (participant de l'ARS n°2, DR)* *Eau de surface : « On se **baigne** dedans aujourd'hui ! » (participant du SMRD, DR)* *Autres risques : « On sait très bien que tous **les polluants** qui passent dans la station d'épuration ne sont **pas forcément traités** » (participant de l'AE LB, CF)* *Autres risques : « **Crainte** sur la **régularité de la qualité, micropolluants, métaux lourds**, sur les accumulations à long terme » (participant agriculteur/SIID, DR)* *Autres risques : « Je dirai d'accord mais à **condition de préciser sur quel danger** on s'appuie » (participant de l'Univ. de CF, CF)*	*Mesures à mettre en place : « Faire des contrôles et traitements bactériologiques » (participant de VEOLIA, PQ)*	*Existence d'une réglementation : « C'est une pratique à risque si derrière, il n'y **a pas un encadrement** » (participant de l'ARS n°1, CF)*	

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

Tout à fait d'accord		*<u>Bonnes pratiques</u> : « J'ai **bien conscience** des risques, toutefois lorsque **des mesures de réduction et de surveillance** sont prises, le risque est réduit voire supprimé » (participant du PNPC n°2, PQ)*		

Tableau 30 : Extraits de réponses apportées par les participants pour répondre à l'affirmation concernant la REUT comme une pratique pouvant présenter des risques pour la santé humaine et animale

Ainsi, différents facteurs influençant potentiellement la réponse vis-à-vis de notre affirmation ont été identifiés :

- <u>les connaissances vis-à-vis des risques</u> : des participants du domaine agricole ayant mentionné un manque de connaissances ont indiqué une réponse neutre ou défavorable à l'affirmation. Ce résultat fait écho à certaines études sur la connaissance des agriculteurs concernant les risques associés à la REUT (Keraita *et al.,* 2008 ; Drechsel *et al.,* 2011). A l'inverse, des participants institutionnels et scientifiques ont indiqué des connaissances élevées vis-à-vis des risques et une réponse favorable à l'affirmation ;
- <u>les connaissances vis-à-vis de la gestion en place</u> : des participants ayant indiqué une connaissance de la gestion mise en place (traitement, suivi…) ont indiqué une réponse défavorable à l'affirmation ;
- <u>la confiance envers les gestionnaires et les retours d'expérience</u> ;
- <u>la comparaison des risques associés à d'autres ressources en eau utilisées pour l'irrigation agricole</u> : certaines eaux conventionnelles (notamment les eaux de surface) utilisées pour l'irrigation agricole ou pour la baignade qui sont parfois l'exutoire d'une ou plusieurs stations d'épuration, ce qui correspond au final à de la REUT *de facto*. Leur qualité n'est pas toujours aussi élevée que celle atteinte pour la REUT, ce qui amène certains participants à indiquer une réponse défavorable à l'affirmation ;
- <u>les interrogations vis-à-vis d'autres risques présents dans les EUT</u> : les interrogations sur la présence de risques chimiques amènent certains participants à indiquer une réponse favorable à l'affirmation ;
- <u>la présence d'un cadre réglementaire et son respect</u> : l'encadrement, souvent stricte, de la pratique par une réglementation amène des participants à indiquer une réponse défavorable à l'affirmation ;
- <u>les usages concernés</u> : l'utilisation des EUT pour certains usages considérés « sensibles » comme le maraîchage amène à indiquer une réponse favorable.

Comme indiqué dans la partie précédente, pour l'ensemble des trois ateliers, les joueurs ont indiqué le degré de connaissances qu'ils estimaient avoir sur les mesures de gestion des risques sur une échelle de Likert allant de 1 (faibles connaissances) à 5 (fortes connaissances). Cette question a également été posée pour les risques. La Figure 41 propose une éventuelle corrélation entre les degrés de connaissances sur les risques et les mesures et la réponse indiquée vis-à-vis de l'affirmation.

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

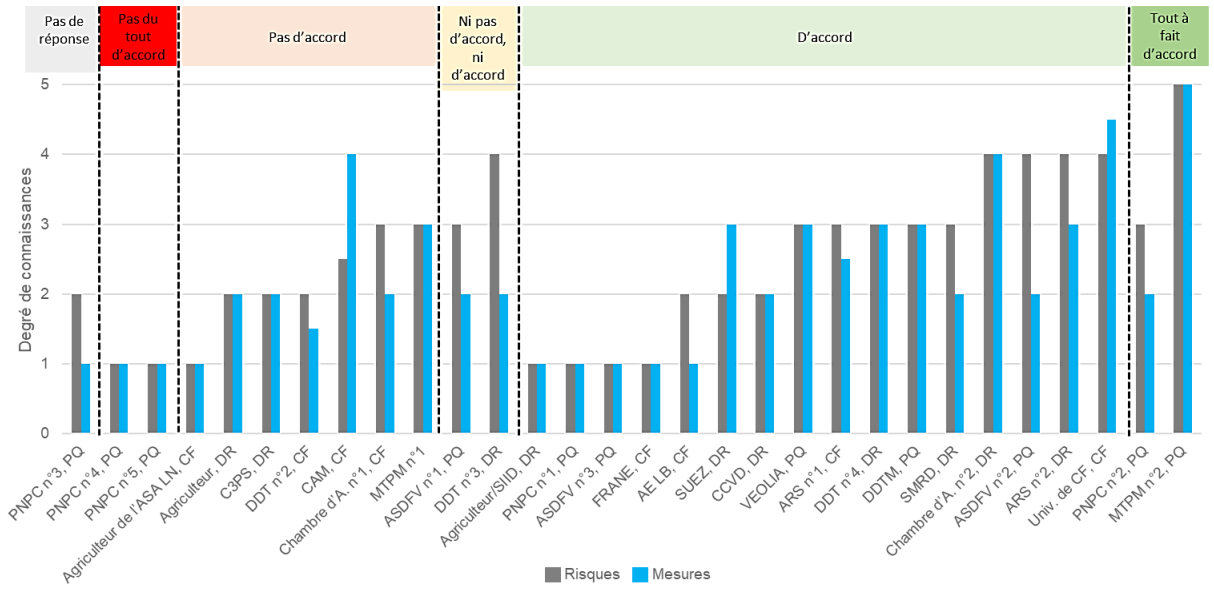


Figure 41 : Tentative de corrélation entre les degrés de connaissances vis-à-vis des risques et des mesures de gestion indiqués par les participants et leur positionnent vis-à-vis de la REUT comme pratique pouvant représenter des risques pour la santé humaine

Quelques corrélations ont pu être faites entre la perception des risques et le degré de connaissances mais elles ne se vérifient pas systématiquement :

- La perception d'un faible niveau de connaissances vis-à-vis des risques (<2/5) peut amener à indiquer la REUT comme n'étant pas une pratique à risque (*PNPC n°4, PQ* et *PNPC n°5, PQ*) mais aussi comme étant une pratique à risque (*agriculteur/SIID, DR* et *PNPC n°1, PQ*) notamment lorsque des questionnements existent vis-à-vis de ces risques ;
- La perception d'un niveau moyen de connaissances vis-à-vis des risques (entre 2 et ≤ 3/5) mais une forte connaissance vis-à-vis des mesures de gestion peut amener à indiquer la REUT comme n'étant pas une pratique à risque (*CAM, CF*) ;
- La perception d'un fort niveau de connaissances vis-à-vis des risques (≥4/5) peut amener à indiquer la REUT comme étant une pratique à risque (*Univ. de CF, CF*) puisque les risques sont connus, ou bien un positionnement neutre (*DDT n°3, DR*) dépendant de certains facteurs comme la qualité atteinte ou les usages.

Ainsi, ces résultats confirment bien que la perception des risques est influencée par un vaste ensemble de facteurs et qu'elle est peut être difficile à prévoir.

- **Une perception qui influence les usages agricoles envisagés ?**

Comme indiqué précédemment, la perception des risques peut varier selon les usages considérés. Pour les ateliers de la Drôme et de Porquerolles, nous avons demandé aux participants d'indiquer leur positionnement sur l'utilisation d'EUT pour divers usages (Figure 42).

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

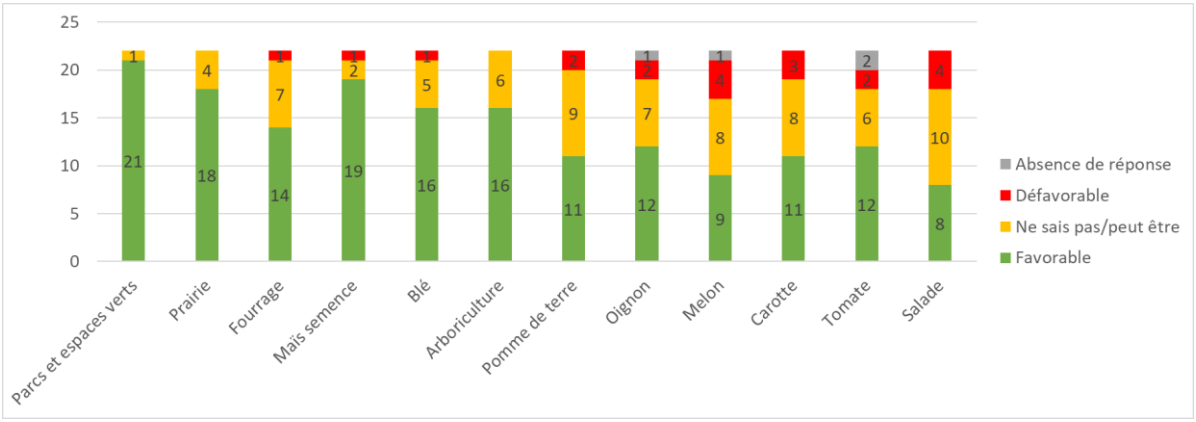


Figure 42 : Positionnement vis-à-vis de différents usages agricoles (Drôme et Porquerolles)

Les cultures destinées à l'alimentation humaine (*à droite*) ont recueilli le plus grand nombre d'avis neutres et défavorables, en particulier les cultures consommées crues comme la salade. Un avis défavorable pour ces cultures est indiqué que les consommateurs sont « directement » concernés par les risques contrairement à des cultures transformées comme les céréales. Pour certains participants, les EUT doivent être utilisés pour des produits alimentaires qui ne sont pas en contact avec l'EUT.

> [Questionnaire *ex ante*] *« Plutôt favorable à l'utilisation sur des céréales mais dubitative sur les fruits et légumes de maraîchage. Risques directs versus risques indirects d'exposition des consommateurs » (ARS n°2, DR)*

> [Questionnaire *ex ante*] *« Utilisation des eaux usées traitées dans un cadre où il n'y a pas de contact entre l'eau et les produits pour la consommation humaine »* (*ASDFV n°1, PQ)*

Certaines réponses neutres et favorables sont accompagnées de conditions pour valider le positionnement :

> [Questionnaire *ex ante*] *« Favorable systématiquement sous condition de la qualité de l'eau et des analyses correspondantes » (ASDFV n°3, PQ)*

> [Questionnaire *ex ante*] *« A conditions que ce soit géré au mieux (limiter les risques et information de la population concernée » (DDTM, PQ)*

Au final, comme pour les résultats précédents, il est important d'apporter des informations sur les pratiques mises en œuvre pour assurer que l'utilisation des EUT ne représente pas de risque pour la santé.

La Figure 43 propose d'analyser les réponses des participants pour l'ensemble des usages et de tenter de faire une corrélation avec les réponses indiquées vis-à-vis de l'affirmation indiquant que la REUT est une pratique pouvant présenter des risques.

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

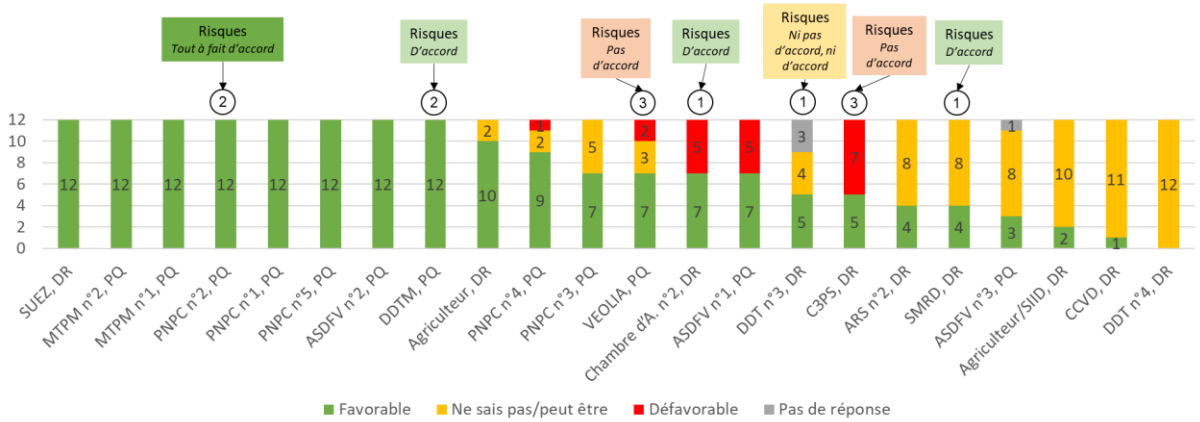


Figure 43 : Comparaison entre les réponses associés aux usages agricoles et la perception de la REUT comme une pratique pouvant représenter des usages

Ainsi, huit participants sur 22 sont favorables à l'ensemble des usages. D'autres indiquent un positionnement plus mitigé avec une majorité de réponses neutres pour six participants. Concernant l'éventuelle corrélation avec la perception de la REUT comme pouvant être une pratique à risque, elle peut être positive (Figure 43, n°1). Ainsi, la réponse favorable à l'affirmation peut amener un avis défavorable concernant certaines cultures, en particulier les cultures consommées crues (*Chambre d'A. n°2, DR*) ou un positionnement mitigé (*SMRD, DR*). Un avis neutre sur la question peut amener à un positionnement neutre à vis des usages (*DDT n°3, DR*). Néanmoins, elle n'est pas toujours vérifiée. Ainsi, malgré une réponse favorable à l'affirmation, l'ensemble des usages peut être envisagés (Figure 43, n°2). A l'inverse, une réponse défavorable à l'affirmation n'est pas nécessairement associée à une réponse favorable pour l'ensemble des cultures (Figure 43, n°3). Ainsi, des attitudes parfois « contradictoires » sont observées. Des explications peuvent être identifiées à travers les justifications indiquées par les joueurs. Par exemple, les interrogations sur les risques associés à certaines cultures peuvent influencer la réponse :

> [Questionnaire *ex ante*] *« Je m'interroge en tant que consommateur sur de possibles traces de polluants dans de la culture alimentaire directe » (SMRD, DR)*

Un besoin d'acquérir des informations pour pouvoir se positionner a été exprimé par plusieurs participants :

> [Questionnaire *ex ante*] *« Je n'ai pas assez de connaissance pour avoir un jugement sur ces 2 espèces (melon et salade) » (agriculteur, DR)*

> [Questionnaire *ex ante*] « *Je ne suis pas qualifié, le sujet a besoin d'avis scientifiques éclairés* » (*agriculteur/SIID, DR*)

Les risques sanitaires ne sont pas les seules raisons qui ont orienté la réponse des participants. Ainsi, un des participants de la Drôme a indiqué un avis défavorable envers certaines cultures aussi bien alimentaires (salade, tomate, melon…) que non alimentaires (maïs, fourrage…) en raison de leur consommation en eau et/ou d'un besoin de produire des cultures locales. Ainsi, un avis favorable pour l'oignon, la carotte et l'arboriculture, des cultures emblématiques de la Drôme :

> [Questionnaire *ex ante*] *« Je suis pour une agriculture qui nécessite peu d'arrosage et de plantes endémiques. La REUT doit être un soutien à cette agriculture » (C3PS, DR)*

D'autres facteurs influencent donc dans le positionnement des participants vis-à-vis des usages au-delà des risques sanitaires.

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

Lors des entretiens *ex ante* menés avec les participants de l'atelier de Clermont-Ferrand, des besoins similaires ont été exprimés notamment par les acteurs institutionnels :

> [Entretien *ex ante*] « *Par rapport à ma connaissance, oui je pense que je ne suis quand même pas au point sur le sujet. Voilà, j'ai suivi un peu les travaux par rapport l'ASA LN, mais bon, je ne maîtrise pas réellement le sujet (…) Des résultats que je vois, je vois que ça marche, mais je pense qu'à mon niveau, il y a besoin que j'acquière davantage de connaissances » (participant de la DDT, Clermont-Ferrand)*

Des méthodes sont également nécessaires pour accompagner l'évaluation des risques associés à la REUT :

> [Entretien *ex ante*] *« Des méthodes qui permettent d'identifier précisément les dangers présents dans chaque type d'eau qu'on va proposer à la REUT, ensuite des informations sur les niveaux d'exposition précis et puis la possibilité d'établir des relations dose effet » (Univ.de CF, CF).*

En conclusion, cette analyse *ex ante* de la perception des risques a confirmé les résultats de la littérature indiquant qu'elle est parfois hétérogène, influencée par différents facteurs et surtout difficilement prévisible. Un besoin d'informations a été exprimé à plusieurs reprises. Nous verrons dans la partie suivante que la construction collective a, en partie, répondu à ce besoin.

3.3.2 Un partage des représentations à travers la construction des scénarios d'exposition

Les scénarios d'exposition construits par les joueurs des trois ateliers sont présentés dans le Tableau 31.

		Voie attribuée selon les ateliers		
Rôle	**Populations exposées**	**Clermont-Ferrand**	**Drome**	**Porquerolles**
Traitement supplémentaire	Personnel de traitement	*Absence d'aérosols*	*Absence de traitement supplémentaire*	*Absence de traitement supplémentaire*
Maïs semence (aspersion, rampe)	Personnel d'irrigation	**Eau**	**Eau**	**Eau**
	Personnel d'entretien	**Plante**	**Plante**	*Dépérissement naturel de quatre jours avant l'entretien*
	Personnel de récolte	*Récolte mécanisée*	*Récolte mécanisée*	*Récolte mécanisée*
	Riverains	**Air**	**Air**	**Air**
	Passants	**Air**	**Air**	**Air**
	Consommateurs	*Culture non alimentaire*	*Culture non alimentaire*	*Culture non alimentaire*
Pomme de terre (aspersion, canon-enrouleur)	Personnel d'irrigation	**Eau**	**Eau**	*Système d'irrigation automatique*
	Personnel d'entretien	*Entretien mécanisé*	*Entretien mécanisé*	*Entretien mécanisé*
	Personnel de récolte	**Plante**	**Sol**	**Sol**
	Riverains	**Air**	**Eau**	**Eau** + **Air**
	Passants	**Air**	**Eau**	**Eau**
	Consommateurs	**Produit**	**Produit**	*Cuisson du produit final*
Carotte (micro-aspersion)	Personnel d'irrigation	**Eau**	*Système d'irrigation automatique*	*Système d'irrigation automatique*
	Personnel d'entretien	*Entretien mécanisé*	*Entretien mécanisé*	*Entretien mécanisé*
	Personnel de récolte	*Récolte mécanisée*	*Récolte mécanisée*	*Récolte mécanisée*
	Riverains	**Eau** + **Air**	*Micro aspersion*	**Air**
	Passants	**Eau** + **Air**	*Micro aspersion*	**Air**
	Consommateurs	**Produit**	**Produit**	**Produit**
Oignon (aspersion, canon-enrouleur)	Personnel d'irrigation		*Système d'irrigation automatique*	**Eau** + **Air**
	Personnel d'entretien		*Entretien mécanisé*	**Sol** + **Plante**
	Personnel de récolte		*Récolte mécanisée*	**Sol** + **Plante**
	Riverains		**Air**	**Eau** + **Air**
	Passants		**Air**	**Eau** + **Air**
	Consommateurs		**Produit**	**Produit**
Noyer	Personnel d'irrigation		*Système d'irrigation automatique*	

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

(micro-aspersion sous frondaison)	Personnel d'entretien		*Entretien mécanisé*	
	Personnel de récolte		*Récolte mécanisée*	
	Riverains		*Micro-aspersion*	
	Passants		**Eau**	
	Consommateurs		Lavage, séchage et pelage	
Pomme (micro-aspersion sous frondaison)	Personnel d'irrigation			*Système d'irrigation automatique*
	Personnel d'entretien			**Plante**
	Personnel de récolte			**Plante**
	Riverains			**Air**
	Passants			**Air**
	Consommateurs			**Produit**
Tomate (goutte à goutte de surface)	Personnel d'irrigation	**Eau**	*Système d'irrigation automatique*	**Eau**
	Personnel d'entretien	*Goutte à goutte*	*Goutte à goutte*	*Goutte à goutte + paillage**
	Personnel de récolte	**Sol**	*Goutte à goutte*	*Goutte à goutte + paillage**
	Riverains	*Goutte à goutte*	*Goutte à goutte*	*Goutte à goutte*
	Passants	*Goutte à goutte*	*Goutte à goutte*	*Goutte à goutte*
	Consommateurs	*Goutte à goutte*	**Produit**	*Goutte à goutte + paillage**
Salade (micro-aspersion)	Personnel d'irrigation			*Système d'irrigation automatique*
	Personnel d'entretien			**Plante**
	Personnel de récolte			*Absence d'explication*
	Riverains			*Absence d'explication*
	Passants			*Absence d'explication*
	Consommateurs			**Produit**

*Légende : en italique = justification apportée par les joueurs pour considérer la population comme « non exposée » ; **en noir** = culture non abordée pendant l'atelier, * = mesure barrière non indiqué par l'outil et ajoutée par les joueurs*

Tableau 31 : Résultats obtenus lors de l'identification des populations exposées et de l'attribution des voies d'exposition

Comme indiqué dans le Tableau 31, les joueurs ont indiqué pour chaque culture i) les différentes catégories de populations exposées et ii) la voie d'exposition concernée (*indiquée en couleur dans le tableau*). Certaines populations ont été considérées comme « non exposée » grâce à l'existence de différentes mesures *barrières* (*indiquée en italique dans le tableau*). Pour rappel, l'état de l'art nous avait permis d'identifier un ensemble de populations exposées et de voies d'exposition (Chapitre 1, section 1.2.4). Ils étaient proposés aux joueurs à travers des cartes représentant les populations et les voies. Nous avions fait le choix de limiter les participants dans l'attribution des voies d'exposition. La voie représentant le cas *le plus défavorable*, c'est-à-dire où l'exposition était la plus élevée, devait être retenue. Nous avions fait ce choix afin de simplifier la construction des scénarios d'exposition. Comme indiqué dans le Tableau 31 présenté précédemment, certains joueurs ont cependant choisi plusieurs voies d'exposition. Nous verrons qu'il a été difficile pour certains joueurs de trancher entre les différentes voies. De plus, ce choix présente certaines limites méthodologiques qui ont été soulignées par des joueurs pendant l'atelier. Nous aborderons cet élément pendant cette partie et plus en profondeur dans la partie consacrée à la discussion des résultats.

Si les supports proposés ont été similaires entre les ateliers, la configuration de cette étape a été organisée différemment. Pour les ateliers de Clermont-Ferrand et de la Drôme, la réflexion a été réalisée collectivement tout du long de cette étape. Les joueurs sont restés autour du plateau, l'identification et le temps d'échange étaient organisés par le facilitateur. Chaque joueur a successivement identifié les populations exposées pour son système et a attribué des voies d'exposition. Les autres joueurs apportaient alors des compléments pour aider à l'identification ou exprimer leur désaccord. Pour l'atelier de Porquerolles, les cartes représentant les populations exposées et les voies d'exposition étaient disposées sur un table extérieure au plateau. Les joueurs se sont déplacés et le temps de réflexion a d'abord été réalisé entre binôme ou en plusieurs groupes de binôme. Les choix de chaque groupe ont ensuite été présentés et discutés à l'ensemble des joueurs autour du plateau. Ces différences de configuration ont pu influencer les résultats produits et expliquer la raison de plusieurs voies attribuées par population exposée pour cet atelier contrairement à ceux

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

de la Drôme et de Clermont-Ferrand. Dans la configuration utilisée à Porquerolles, la réflexion était plus individuelle. Les joueurs ont pu laisser libre court à leur ressenti contrairement à la configuration collective utilisée dans les deux autres ateliers où les résultats des joueurs ont été plus orientés par les autres participants. Ces éléments peuvent expliquer les différences de résultats obtenues entre les ateliers et notamment l'identification de plusieurs voies d'exposition pour l'atelier de Porquerolles.

3.3.2.1 Identification des risques pour les professionnels

- **Identification de l'exposition du personnel en charge de l'irrigation**

Comme indiqué dans la partie précédente, l'exposition du personnel en charge de l'irrigation a été indiquée bien que les systèmes d'irrigation soient automatiques. Elle a été indiquée pour l'ensemble des parcelles lors de l'atelier de Clermont-Ferrand et pour certaines parcelles lors des ateliers de Porquerolles et de la Drôme. Ils peuvent être exposés aux aérosols lorsqu'ils circulent dans les champs pendant l'irrigation ou aux gouttelettes d'eau lors de la maintenance du réseau de distribution, la gestion de défaillances du système ou encore la mise en place de certains systèmes d'irrigation. Lors de l'atelier de Clermont-Ferrand, une exposition plus fréquente du personnel d'irrigation a été indiquée lors de l'utilisation des systèmes d'aspersion par canon-enrouleur que lors de l'utilisation des rampes d'aspersion. En effet, les enrouleurs doivent être déplacés et nécessitent d'être branchés, il y donc une manipulation plus fréquente des équipements.

Des perceptions différentes des fréquences d'exposition ont été identifiées chez les acteurs opérationnels notamment lors de l'atelier de Porquerolles. Pour un des membres de l'ASDFV, la fréquence d'intervention sur les systèmes d'irrigation automatique en goutte à goutte est faible. Le risque est donc suffisamment réduit pour ne pas considérer l'exposition du personnel en charge de l'irrigation :

> [Tour 2, étape 1] *« On est en automatique mais on a considéré qu'à chaque fois que tu démontes un filtre, un raccord…c'est très résiduel, une fois à l'installation, une fois au démontage mais tu peux être exposé. Deux fois dans l'année. Ou lors d'une intervention pour une* fuite » (*rôle « agriculteur – tomate », participant de l'ASDFV n°2, PQ*)

Un autre membre de de l'ASDFV a néanmoins des fréquences d'exposition importantes pour ces systèmes :

> [Tour 2, étape 1] *« Toujours une intervention, purger les réseaux, les goutteurs qui se bouchent, les tuyaux qui pètent. J'ai toujours les mains dedans » (rôle « agriculteur – maïs semence », participant de l'ASDFV n°1, PQ)*

Ces indications indiquent une certaine différence de perception entre ces joueurs. Ces expositions répétées ne sont néanmoins pas nécessairement perçues comme un problème :

> [Tour 2, étape 1] *« Ça fait sept ans maintenant, je ne mets pas de gants, je me protège pas, pourtant l'eau a des odeurs vraiment costaux, j'ai jamais d'infection » (rôle « agriculteur – maïs semence », participant de l'ASDFV n°1, PQ)*

Ce joueur avait indiqué une réponse neutre concernant la REUT comme une pratique pouvant représenter des risques et avait indiqué n'avoir aucune notion des risques potentiels. Ce résultat fait écho à certaines études sur la perception des agriculteurs concernant leur exposition (Keraita *et al.,* 2008 ; Drechsel *et al.,* 2011).

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

- **Identification de l'exposition du personnel d'entretien des cultures et du personnel de récolte**

L'exposition des personnels intervenant après l'irrigation pour l'entretien des cultures et pour la récolte a également été identifiée pour plusieurs parcelles. Ces populations peuvent être exposées par le portage main-bouche après un contact par la plante ou le sol.

Une absence d'exposition de ce personnel a été considérée lorsque la dose d'exposition était estimée comme suffisamment résiduelle :

> [Tour 2, étape 1] *« Vu les vitesses de dégradation je pense que le sol, ce n'est pas un gros risque … quand il est mouillé oui, mais quand il est sec, c'est largement acceptable. Je ne pense pas que ce soit un problème. » (rôle « agriculteur – maïs semence », participant de l'ASDFV n°1, PQ)*

Par exemple, c'est le cas du personnel d'entretien de la parcelle « *maïs semence* » lors de l'atelier de Porquerolles. Il a été considéré que la réduction de 4 log permise par le délai de 4 jours entre la dernière irrigation et la castration manuelle du maïs semence (mesure « *dépérissement* ») était suffisante pour ne pas considérer l'exposition du personnel en charge de l'entretien. Les joueurs ont indiqué que la réduction permettait finalement d'atteindre un niveau équivalent à une classe A (P2_OP).

Ce fut également le cas pour certaines parcelles en goutte à goutte comme la tomate. Lors de l'atelier de la Drôme, il a été considéré que cela permettait une non-exposition du personnel d'entretien et de récolte compte tenu de la distance entre les parties comestibles et le système d'irrigation bien que l'entretien et/ou la récolte étaient réalisés manuellement :

> [Tour 2, étape 1] *« Les tomates elles poussent comment ? je ne connais pas bien… Mais bon elles ne vont pas être exposées au sol qui va être arrosé donc à la limite, ils ont pas de raison d'être exposé parce que la tomate elle a pas été aspergée » (rôle « agriculteur – tomate », participant de l'ARS n°2, DR)*

Des résultats différents ont néanmoins été obtenus selon les ateliers. Par exemple, pour l'atelier de Clermont-Ferrand, le personnel de récolte de la tomate a été considéré comme potentiellement exposé à l'ingestion de particules de sol. Les joueurs ont considéré l'éventualité qu'un fruit tombe et que le personnel de récolte entre alors en contact avec le sol pour la ramasser :

> [Tour 2, étape 1] *« Si c'est vraiment au pied de la plante, il n'y a pas de contact sauf si le tuyau est percé. Dans l'absolu, je dirai que le personnel de récolte il est en contact avec l'ensemble de la production de tomates. Même si l'eau est administrée de façon précise au pied de la plante et au niveau du sol, il peut faire tomber une tomate, il peut déplacer des feuilles, toucher la terre à un moment donné. On ne peut exclure complètement le contact » (rôle « agriculteur - carotte », participant de l'Univ. de CF, CF)*

- **Identification de l'exposition du personnel intervenant sur la filière de traitement supplémentaire (lagunes de maturation)**

L'exposition du personnel en charge du traitement supplémentaire n'a pas été abordée pour les ateliers de la Drôme et de Porquerolles compte tenu de l'absence d'unité de traitement supplémentaire contrairement à Clermont-Ferrand où les lagunes étaient mises en place. Dans le cas de Clermont-Ferrand, un joueur a indiqué que le personnel en charge du traitement supplémentaire pouvait généralement être exposé aux aérosols. Cela a été contesté par un des observateurs, bien que ce participant n'était pas censé intervenir pendant la session de simulation.

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

[Tour 2, étape 1] *« Il peut être exposé à des aérosols, particules qui vont renfermer des micro-organismes et des substances chimiques » (rôle « agriculteur - carotte », participant de l'Univ. de CF, CF)*
« Les aérosols avec les lagunes, personnellement je ne vois pas » (observateur, Somival Ingénierie)

Néanmoins, les joueurs ont éliminé la voie « inhalation », modifiant ainsi la proposition initiale. La nécessité d'évaluer les risques pour ce personnel a été interrogée. En effet, les professionnels sont censés porter des EPI :

[Tour 2, étape 1] *« Mais comme on est avec du personnel qui est dans un cadre professionnel, il y a obligation de port d'équipements individuels de protection (…) Le Code du travail stipule que, s'il y a un risque identifié, l'employeur a obligation de mettre à disposition du personnel exposé des équipements individuels de protection. Ok, l'employeur peut le faire, le fait, c'est une obligation pour lui. Après il y a la vraie vie. Peut-on être certain que chaque personnel concerné va porter ses EPI ? Si vous échangez avec les services de santé au travail, ils vous diront que selon les contextes…» (rôle « agriculteur - carotte », participant de l'Univ. de CF, CF)*

Il a été reconnu que cette mesure n'est néanmoins pas toujours effective en particulier lors des périodes estivales. Cela fait écho aux éléments indiqués dans la littérature justifiant la difficulté de faire appliquer cette mesure par les professionnels (Keraita *et al.,* 2008 ; Drechsel *et al.,* 2011 ; Amoah *et al.,* 2011). Les joueurs se sont néanmoins interrogés sur la nécessité de considérer les éventuelles défaillances à l'échelle individuelle dans l'évaluation et la gestion des risques :

[Tour 2, étape 1] *« C'est pareil, on en revient à la notion de responsabilité, est ce que la station doit abattre plus parce que en fait les gens qui vont intervenir sur les lagunes potentiellement ne portent pas leur EPI ? (joueur cultivant du maïs semence)*
« Non parce qu'il y aura une convention qui avertira l'ASA LN des risques auxquels ils s'exposent » (rôle « collectivité », participant de la CAM, CF)

Ce résultat est intéressant car, au final, le personnel de traitement et également d'irrigation sont les premiers exposés aux EUT. Néanmoins, cette exposition semble assez peu considérée par les cadres réglementaires mais aussi par les joueurs. Les résultats obtenus lors de la construction collective du scénario *multi-barrières* montre que peu de mesures ont été prises pour réduire les risques pour les professionnels. Cela fait écho les résultats de la littérature qui indiquent que les risques associés aux professionnels sont souvent considérés comme « inhérents » à la profession.

3.3.2.2 Identification des risques pour les non professionnels

- **Identification de l'exposition des riverains et des passants**

Dans les trois cas fictifs, des habitations (10m) et un chemin de passage (5m) étaient situés à proximité de chaque périmètre irrigué. Pour l'ensemble des ateliers, l'exposition des riverains et des passants aux aérosols produits a été considérée pour les systèmes d'aspersion par rampe et par canon-enrouleur. L'exposition à la voie « air » a été retenue en particulier pour les rampes tandis que la voie « eau » a été indiquée lors de l'utilisation de canon-enrouleur. Cela confirme bien la nécessité de distinguer ces deux systèmes d'aspersion, en particulier sur leur production de gouttelettes et d'aérosols. Une objection a néanmoins été émise par un joueur du monde agricole de l'atelier de Clermont-Ferrand concernant l'exposition des riverains et des passants lors de l'utilisation des systèmes d'irrigation par aspersion :

[Tour 2, étape 1] *« Mais ça arrose jusqu'au bord du champ » (rôle « président ASA », participant agriculteur de l'ASA LN, CF)*

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

« Ça déborde sur son chemin » (rôle « agriculteur - carotte », participant de l'Univ. de CF, CF)
« Ça déborde pas. Et même si y'en a dans l'air, y'en a dans l'air » (rôle « président ASA », participant agriculteur de l'ASA LN, CF)

Cet échange confirme une différence de perception des pratiques des agriculteurs mais aussi des risques potentiellement liés à l'exposition aux aérosols. Cette différence de perception concernant les risques de dérive a également été retrouvée dans le cas de la Drôme. Un joueur institutionnel a indiqué que les systèmes par canon dérivaient beaucoup *(rôle « agriculteur – noyer », participant de la DDT n°4, DR*) et risquaient d'exposer les riverains et les passants. Un joueur opérationnel a indiqué que, même si une partie pouvait être perdue, cela n'atteignait néanmoins pas les 10m et donc pas les habitations *(rôle « collectivité », participant agriculteur/SIID, DR).*

L'identification de l'exposition des riverains et des passants en particulier pour les joueurs cultivant du maïs semence a soulevé des interrogations concernant les exigences réglementaires. En effet, lors du premier tour, ces joueurs étaient conformes pour l'irrigation puisque la qualité D était atteinte en sortie de STEP. Or l'identification collective a montré que les riverains et les passants étaient potentiellement exposés aux microorganismes pathogènes par la dispersion des gouttelettes et des aérosols. Les joueurs se sont donc interrogés des conséquences sur la santé de ces populations en particulier pour la qualité D :

[Tour 2, étape 1] *« Après à 4 cubes chez lui (nb : concentration en E.coli) on était conforme pour arroser ! » (participant non identifié)*
« La remarque elle est quand même pertinente parce qu'on distribue l'eau qui répond aux exigences réglementaires et pour autant y'a des risques pathogènes (…) c'est quand même fort je trouve » (rôle « agriculteur – noyer », participant de la DDT n°4, DR)

Cette étape a donc soulevé une autre limite concernant la gestion des risques pour l'approche conventionnelle basée sur des critères de qualité à atteindre.

- **Identification de l'exposition du consommateur**

Le consommateur n'est pas exposé lors de la production de cultures non alimentaires comme le maïs semence. Comme pour le personnel d'entretien et de récolte, une non-exposition des consommateurs a également été considéré lorsqu'une dose résiduelle est atteinte grâce à la mise en place de mesures *barrières* : contribution de la cuisson pour la pomme de terre, contribution du système en goutte à goutte pour la tomate, contribution des mesures post-récolte pour la noix :

[Tour 2, étape 1] « *J'abats 4 unités log entre le lavage, le séchage et le pelage de la noix dont le consommateur est pas concerné » (rôle « agriculteur – noyer », participant de la DDT n°4, DR)*

Si l'hypothèse que le fruit peut tomber au sol avait été fait pour le personnel de récolte (Clermont-Ferrand), elle n'a pas été considérée pour le consommateur.

3.3.2.3 Emergence de nouveaux scénarios d'exposition

Les joueurs ont identifié d'autres populations exposées qui n'étaient pas proposées par les supports de l'outil :

- les professionnels intervenant après la récolte pour la distribution ou le conditionnement des produits (atelier de Clermont-Ferrand) ;
- les animaux de compagnie qui pourraient éventuellement être des vecteurs de transmission (atelier de Clermont-Ferrand) ;

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

- les enfants qui jouent dans des flaques résultant de l'accumulation de ruissellements en cas de fuite du réseau (atelier de Porquerolles).

Les joueurs se sont également interrogés sur la nécessité d'envisager certains évènements tels que :

- les non-professionnels qui viendraient glaner dans les champs après la récolte interrogeant également la responsabilité de l'agriculteur en cas de prise en compte de cet évènement (atelier de Clermont-Ferrand) ;
- les personnels agricoles qui consommeraient les produits directement au champ (atelier de Clermont-Ferrand) ;
- les passants qui viennent sous le jet d'irrigation pour se déshydrater (atelier de Clermont-Ferrand, Drôme).

Ces éléments indiquent la contribution de l'exercice pour faire émerger de nouveaux scénarios au-delà de ceux retenus dans notre modèle. Néanmoins, ces éléments ont été finalement mis de côté lors de la construction des scénarios d'exposition. En effet, les supports proposés par l'outil ne permettaient pas d'ajouter de nouvelles populations exposées. Concernant les évènements identifiés, leur caractère « exceptionnel » et le nombre de scénarios d'exposition déjà établis ont amené les joueurs à ne pas retenir ces évènements. La mise de côté de ces éléments pour l'évaluation des risques a entraîné des interrogations chez certains participants concernant la validité des résultats obtenus. C'est le sujet de notre prochaine section.

3.3.3 Conclusion sur les apports d'une construction collective des scénarios d'exposition

L'analyse *ex ante* a confirmé les résultats de la littérature concernant une certaine hétérogénéité des perceptions sur les risques associés à la REUT par les différentes parties prenantes. Les facteurs d'influence semblent multiples : poste occupé, degré de connaissances sur les risques, degré de connaissances sur les mesures de gestion… Néanmoins, il est difficile de prévoir les attitudes vis-à-vis des risques et des usages à partir de ces facteurs.

Si certains joueurs ont débuté cette étape en indiquant qu'il « *y'a des risques pour tout le monde » (rôle « agriculteur – carotte », participant du PNPC n°2, PQ)*, le processus d'identification collective a montré que l'ensemble des populations n'était pas toujours exposé aux microorganismes pathogènes. Les pratiques existantes et les équipements utilisés peuvent contribuer à empêcher l'exposition de certaines populations. Les réflexions individuelles et collectives ont montré l'intérêt de réaliser cette identification en mobilisant différents acteurs de la filière. Cela permet de confronter les perceptions hétérogènes mais également d'apporter des informations clés aussi bien scientifiques que opérationnelles qui sont nécessaires pour construire la gestion.

Cette étape d'identification a également permis d'interroger la gestion des risques pour les cultures les moins strictes. Une qualité D est autorisée, par exemple, pour les cultures industrielles ou semencières qui sont irriguées avec des systèmes d'irrigation par aspersion. Si le consommateur est protégé pour ces qualités, l'identification collective a montré que le personnel agricole, les riverains et les passants peuvent être exposés à cette qualité.

Nous verrons dans la prochaine partie que les résultats obtenus ne font pas consensus entre les joueurs et que leur objectivité a été questionnée.

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

3.4 Une appréhension collective du cadre réglementaire qui produit différents effets sur les participants

La littérature indique que la REUT rassemble un panel d'acteurs dont les attentes, les besoins et les perceptions sont parfois hétérogènes (Goodwin *et al.,* 2019a). Ces acteurs n'ont pas nécessairement l'habitude de travailler ensemble (Arpe, 2017 ; Noury, 2021). De plus, la gestion des risques nécessite de mobiliser un vaste ensemble de connaissances scientifiques mais aussi du terrain. Ces éléments peuvent ainsi complexifier la construction collective de la gestion des risques. Cette construction aurait pu être d'autant plus complexe que l'introduction d'une nouvelle approche qui propose d'évaluer les risques en se basant sur la dose d'exposition et de les gérer grâce à la mise en place de mesures *barrières* au-delà du traitement est un changement de paradigme.

Comme indiqué sur la Figure 44, la majorité des participants (joueurs des trois ateliers et les observateurs de Clermont-Ferrand) a indiqué avoir appris des choses grâce à l'outil et aux autres participants.

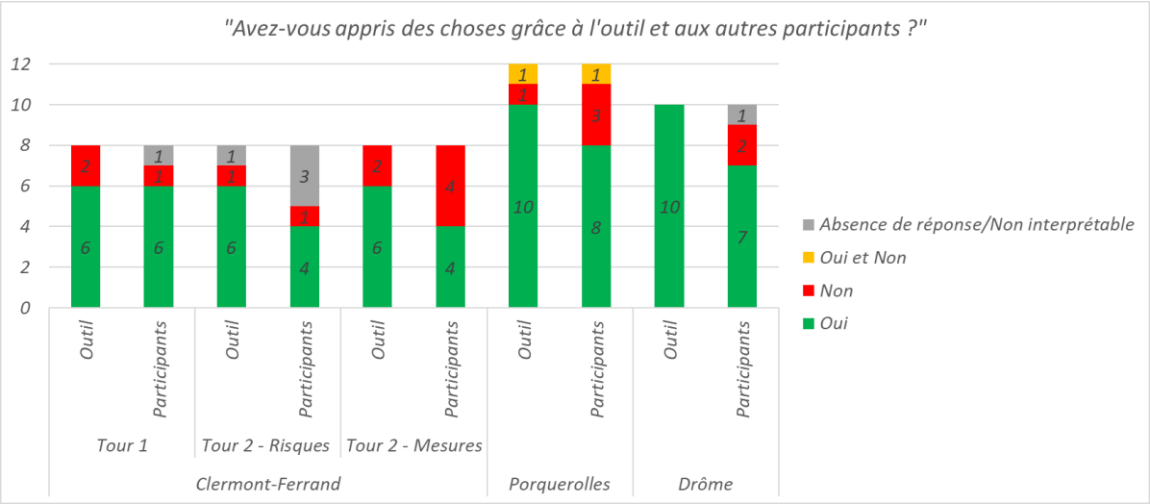


Figure 44 : Apprentissage indiqué par les participants à l'issu des ateliers

Nous aborderons les justifications apportées par les participants concernant leurs réponses plus en détail dans cette partie. Dans un premier temps, nous nous intéresserons donc aux effets d'apprentissage concernant les thématiques que nous avions définies dans notre protocole de suivi-observation : les risques, les mesures de gestion, la réglementation mais aussi les autres parties prenantes. Dans un second temps, nous analyserons la contribution du format « jeu de rôles » pour encourager le partage des représentations et des informations et la collaboration entre les différents acteurs. Nous verrons que l'absence de décisions actées à l'issue de l'atelier a amené des interrogations concernant la contribution du dispositif et l'intérêt de travailler sur un cas fictif. Nous verrons que ces interrogations ne sont pas étrangères à la simulation participative sous la forme d'un jeu de rôles et qu'elles indiquent le besoin de prolonger les discussions à travers d'autres ateliers. Nous terminerons par la portée opérationnelle des résultats produits pendant l'atelier.

3.4.1 Différents effets d'apprentissage cognitifs et relationnels

3.4.1.1 Apprentissage sur les risques

- **Un apport d'informations sur les risques et un questionnement collectif des perceptions individuelles**

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

A l'issue de la simulation exploratoire (Drôme, Porquerolles) et de l'atelier (Clermont-Ferrand), nous avons demandé aux participants des trois ateliers d'évaluer leur degré de connaissances concernant les risques sur une échelle de Likert allant de 1 (faibles connaissances) à 5 (fortes connaissances) (Figure 45).

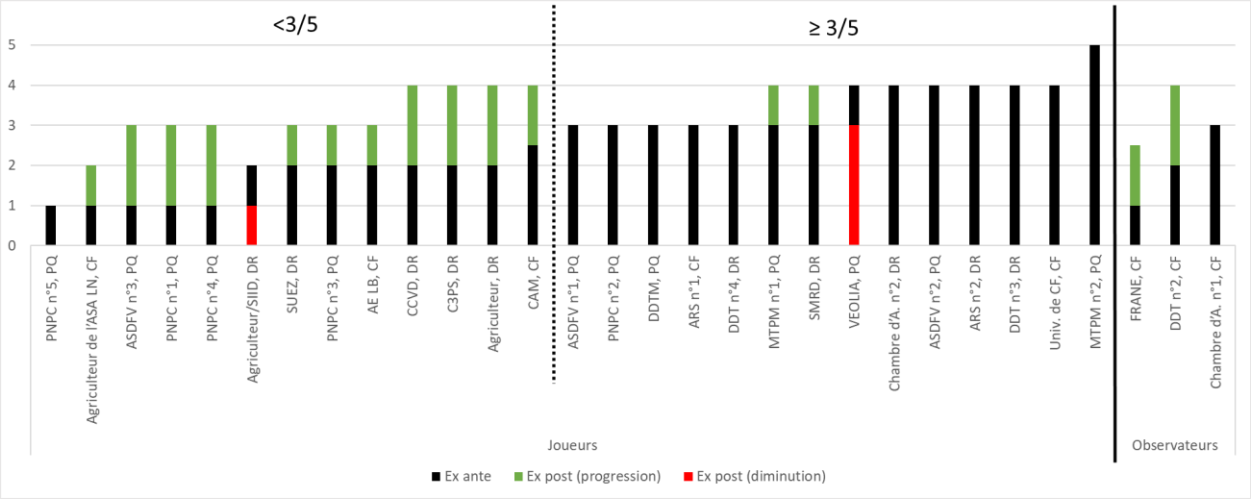


Figure 45 : Évolutions des connaissances sur les risques indiquées par les participants entre les évaluations ex ante et ex post

Ainsi, pour l'ensemble des trois ateliers, 13 joueurs sur les 27 interrogés (48%) ont indiqué une note *ex post* supérieure à celle indiquée *ex ante,* 12 ont indiqué une note similaire (44%) et deux ont indiqué une note inférieure (0,07%). Deux observateurs des trois observateurs de l'atelier de Clermont-Ferrand ont indiqué une note supérieure. Sur les 13 joueurs dont la note *ex ante* était inférieure à 3/5 (*à gauche*), 11 joueurs ont indiqué un niveau *ex post* supérieur (85%). Dans cette tranche, on retrouve certains joueurs qui avaient indiqué un manque et/ou un besoin de connaissances lors de l'analyse *ex ante* (par exemple, *agriculteur de l'ASA LN, CF* ou *agriculteur, DR*). Ce résultat indique donc un apport d'informations à l'issue de l'atelier. Certains joueurs ont donc le sentiment d'avoir acquis des connaissances en particulier pour l'atelier de Clermont-Ferrand puisque les joueurs avaient connaissance de leur note *ex ante*. Comme nous l'avons précisé précédemment, les participants de la Drôme et de Porquerolles n'avaient pas accès à leur réponse *ex ante*. Cela a probablement pu complexifier l'indication d'une progression ou d'une diminution des connaissances par les participants. Par exemple, le joueur « *rôle « collectivité », participant agriculteur/SIID, DR* » a indiqué une note *ex post* inférieure à celle indiquée *ex ante.* Or, ce joueur a répondu positivement aux questions « *avez-vous appris des choses grâce à l'outil et/ou par les participants* » et a indiqué avoir appris des notions liées aux risques (notion de « DALYs », classification des risques). C'est également le cas pour certains participants ayant indiqué une note *ex ante* et *ex post* semblables bien qu'ayant indiqué avoir appris des notions sur les risques. Il est intéressant également de voir que le joueur « *rôle « agriculteur – pomme de terre », participant de la DDT n°3, DR* » avait indiqué n'avoir « *aucune notion des risques* » lors de la question concernant le positionnement vis-à-vis de l'affirmation indiquant la REUT comme une pratique pouvant présenter des risques. Ce joueur a néanmoins indiqué une note *ex ante* de 3/5. Ces éléments peuvent donc indiquer une certaine limite dans notre méthodologie pour capturer l'effet d'apprentissage.

Néanmoins, les indications fournies par les interrogés lors de l'évaluation *ex post* a mis en lumière un apport de différentes notions notamment lors du deuxième tour. Les notions de « DALYs » et de « dose d'exposition » font partie des notions les plus mentionnées par les joueurs, en particulier des acteurs opérationnels, en réponse à la question sur l'apprentissage permis par l'outil et les participants :

[Questionnaire ex post] « Notions de réduction des risques et de dose d'exposition » (rôle « agriculteur – pomme de terre », participant de SUEZ, DR)

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

[Questionnaire ex post] « Dose légale d'exposition » (rôle « agriculteur – maïs semence », participant de l'ASDFV n°1, PQ)

[Entretien ex post] « Si j'ai appris quelque chose c'est les DALY. Je n'avais jamais entendu ce terme » (rôle « observateur », participant de la Chambre d'A. n°1, CF)

Lors de l'évaluation *ex post,* les participants ont indiqué que cette étape d'identification collective des risques a apporté différentes contributions. Tout d'abord, en abordant le risque par l'angle des populations exposées, l'outil amène à réfléchir différemment la gestion des risques *(rôle « collectivité », participant de la CAM, CF).* Cette étape permet de se rendre compte des perceptions parfois hétérogènes entre les différents acteurs et un besoin d'échanger collectivement sur ces sujets :

[Entretien *ex post*] *« Là super intéressant, on voit qu'on n'avait pas forcément tous la même perception et qu'on avait besoin d'échanger sur ce sujet-là, pour bien comprendre les choses. De ce côté-là, c'était super pédagogique et très bien, j'ai trouvé ça très bien. C'est vrai qu'on avait beaucoup de questions et finalement, entre la personne de l'Université et d'autres personnes, on n'avait pas forcément la même vision des choses. Ce n'est pas si facile que ça de bien appréhender ce sujet-là et le fait d'être en groupe et de se poser les mêmes questions, ça c'est bien » (rôle « observateur », participant de la DDT n°2, CF)*

La réflexion collective permet d'aborder des définitions et des notions complexes :

[Entretien *ex post*] *« Grâce aux autres participants dans les discussions on a vite donné des définitions » (rôle « observateur », participant de la DDT n°2, CF)*

En effet, la participation d'entités, notamment scientifiques liées au sanitaire, a amené des connaissances supplémentaires/complémentaires clés à celles proposées par l'outil et ont contribué à enrichir réflexion individuelle et collective. Si l'étape d'identification des mesures *barrières* a montré l'intérêt de l'implication des acteurs opérationnels liés au domaine agricole, cette étape indique également l'intérêt d'associer des acteurs de la recherche pour apporter différentes connaissances pour l'identification des risques. Cela fait écho aux indications de Dingemans *et al.* (2020) qui encouragent la constitution d'une équipe interdisciplinaire pour réaliser l'évaluation des risques compte tenu de la complexité de cette étape.

Ces interactions entre les différentes parties prenantes ont également contribué à modifier certaines perceptions initiales :

[Entretien *ex post*] *« Je pense qu'il y a eu des échanges qui ont pu des fois modifier les choix initiaux donc plutôt satisfaisant » (rôle « agriculteur - tomate » participant de l'AE LB, CF)*

L'intérêt d'une identification collective des risques semble donc confirmé par les participants. La contribution de l'outil pour accompagner cette identification est également souligné. :

[Entretien *ex post*] « *C'est sur cette partie-là réellement, on avait discuté des discussions objective et claire en se référant aussi à ces petites étiquettes qui nous ont permis de rester dans le sujet » (rôle « agriculteur – pomme de terre », participant de l'ARS n°1, CF)*

Il semble répondre au besoin d'un appui méthodologique pour réaliser l'évaluation des risques demandée par le plan de gestion.

Si un participant de l'atelier de Porquerolles *(rôle « agriculteur – carotte », participant du PNPC n°2, PQ)* a indiqué que « *le jeu est très intéressant et très adapté à la prise de conscience des risques* », pour d'autres les avis sont plus mitigés. Le caractère « objectif » des résultats a été remis en question par plusieurs joueurs ainsi que la méthodologie. Nous allons nous intéresser à ces éléments dans la prochaine section

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

- **Des résultats subjectifs par la méthodologie proposée par l'outil et les participants présents**

Tout d'abord, les paramètres indiqués par l'outil semblent discutables. En effet, certains paramètres nécessaires à l'évaluation des risques sont considérés comme manquants. C'est le cas, par exemple, de la voie « *cutané* », dont l'absence a été relevée par deux participants joueurs lié au domaine du sanitaire (*rôle « agriculteur - carotte », participant de l'Univ. de CF, CF ; rôle « agriculteur – tomate », participant de l'ARS n°2, DR).* Une voie considérée comme non-négligeable « *en particulier s'il y a une de blessure* » (*rôle « agriculteur - carotte », participant de l'Univ. de CF, CF*). Ensuite, la pertinence de distinguer les différents personnels agricoles semble questionnable. En effet, au final c'est souvent la même personne :

> [Entretien *ex post*] *« Le personnel d'entretien et le personnel d'irrigation, sincèrement est ce que ce n'est pas la même personne ? » (rôle « agriculteur – pomme de terre », participant de l'ARS n°1, CF)*

Ainsi, ces populations pourraient être exposées à différentes voies d'exposition : air, eau, sol, plante… Retenir une seule voie d'exposition pourrait négliger l'impact d'une multi-exposition. Cette remarque fait écho à l'étude de Seidu *et al.* (2008) où les auteurs indiquent qu'une exposition à plusieurs voies est possible, en particulier pour les agriculteurs. Nous reviendrons sur leurs travaux lors de la discussion.

Certains participants ont exprimé des difficultés pour i) évaluer le potentiel de dispersion lié à l'équipement (portée, débit etc.), ii) décider si ces populations étaient exposées ou non et iii) indiquer si c'était aux aérosols (voir « Air ») ou aux gouttelettes (voir « Eau »). Au-delà de la difficulté pour les joueurs de choisir entre ces deux voies, cette étape a également permis d'identifier une limite de l'outil liée à la contrainte de choisir une seule voie d'exposition. En effet, les risques associés à la voie « ingestion » et à la voie « inhalation » ne concernent pas les mêmes micro-organismes.

Ensuite, concernant les scénarios d'exposition produits qui sont ensuite utilisés pour réaliser l'évaluation des risques et construire le scénario *multi-barrières*, les avis sont partagés. Pour certains, ils représentent bien une réalité du terrain *(rôle « observateur », participant de la DDT n°2, CF*). Pour d'autres, ils reflètent une réalité qui est propre aux joueurs de l'atelier. Au final, ils sont le résultat des subjectivités des participants :

> [Entretien *ex post*] *« Y'a eu une autoformation en fonction de nos réponses. Il faut que ce soit plus clair, pour qu'il n'y ait pas d'ambiguïté. Car selon la formation de base des participants, ce ne sera pas la même réponse » (rôle « agriculteur - carotte », participant de l'Univ. de CF, CF)*

Ainsi, les résultats dépendront donc des joueurs présents, ce qui soulève certaines interrogations quant à la validité de l'exercice et des résultats produits. En effet, comme nous l'avons vu précédemment, différents résultats ont été obtenus selon les ateliers pour une même culture. Ainsi, des populations exposées n'ont pas été considérées dans l'évaluation des risques pour certains ateliers, alors que l'évaluation des risques grâce au modèle QMRA a montré que des risques pouvaient exister pour ces populations dans les ateliers où ils avaient été retenus. C'est le cas, par exemple, du personnel d'irrigation dont l'exposition n'a pas toujours été retenue alors que les objectifs liés à la santé n'étaient pas atteints. Pour le participant de l'Université de Clermont-Ferrand, la considération d'une absence d'exposition pour certaines populations lorsque la dose d'exposition était jugée suffisamment faible pour ne pas considérer l'exposition peuvent amener à une sous-estimation des risques :

> [Entretien *ex post*] *« On a fait l'hypothèse que tous les professionnels portaient leur EPI. Dans la conclusion finale, il faut garder les producteurs d'EUT et utilisateurs, il faut pas leur faire croire qu'il n'y a aucun risque, il faut pas qu'au terme du jeu, ils repartent avec l'idée*

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

qu'aucun risque pour ce type de personnel. Si vous regardez les données réelles, ce n'est pas ça pour les personnels de la lagune et en charge des réseaux de maintenance » (rôle « agriculteur - carotte », participant de l'Univ. de CF, CF)

[Entretien *ex post*] *« Chaque acteur doit être considéré même si le risque zéro est associé » (rôle « agriculteur - carotte », participant de l'Univ. de CF, CF)*

Au final, ces résultats questionnent la contribution de la méthodologie pour objectiver les risques. Néanmoins, il est important de rappeler l'absence d'un réel débriefing pour revenir sur les résultats produits au regard, par exemple, des données de la littérature. Nous reviendrons sur cet élément.

- **Une perception hétérogène des résultats produits**

Les résultats produits par l'identification des risques mais également par la QMRA ont recueilli des avis hétérogènes. Pour le participant de l'Université de Clermont-Ferrand, compte tenu de l'absence de certaines populations exposées, les résultats de l'évaluation des risques risquent d'être une sous-estimation des risques et de transmettre un message faussé :

[Entretien *ex post*] *« Il faut être prudent. Il y a quand même des enjeux sanitaires sérieux derrière. Il ne faut pas donner un faux sentiment de confiance, de sécurité à ceux qui vont utiliser l'outil. » (rôle « agriculteur - carotte », participant de l'Univ. de CF, CF)*

Ces propos rejoignent nos interrogations concernant le choix des paramètres de la QMRA qui peuvent influencer les résultats produits et donc les conclusions des participants. De plus, le dispositif n'aborde que les risques microbiologiques et pas d'autres risques comme les risques chimiques ou les risques environnementaux. Ainsi, l'atteinte des objectifs liés à la santé pour les risques microbiologiques n'est pas nécessairement synonyme d'absence de risques pour les risques chimiques.

Cette perception des résultats comme une éventuelle sous-estimation des risques n'est toutefois pas partagée par certains joueurs. En effet, l'étape d'identification des populations exposées soulève des interrogations quant au degré de finesse de l'identification : jusqu'où faut-il pousser l'identification des populations exposées ? Pour certains joueurs, cette étape encourage à envisager toutes les situations possibles et notamment les « pires cas », amenant alors à une éventuelle sur-estimation des risques :

[Entretien *ex post*] *« A repenser (…) On a tendance à en mettre beaucoup alors que finalement il n'y en a pas tant que ça « (rôle « collectivité », participant de la CAM, CF)*

[Entretien *ex post*] *« Ils sont partis loin dans leur délire. Ils ont le choix, ils peuvent se faire plaisir ! l'eau ça n'a jamais tué personne, moi ça me fatigue ces trucs là (…) Ils jettent bien de l'eau de mauvaise qualité dans les ruisseaux ça ne les dérange pas (…) Faut pas faire peur aux gens. C'est la panique à bord avec eux. On dirait qu'ils vont à la mort » (rôle « président ASA », participant agriculteur de l'ASA LN, CF)*

Les scénarios d'exposition définis par certains joueurs ont entraîné une attitude défaitiste de certains joueurs, notamment opérationnels du domaine agricole, lors de cette étape et également pendant le débriefing :

[Tour 2, étape 1] *« Je pense qu'il faut arrêter d'arroser ce serait plus simple » (rôle « collectivité », participant agriculteur/SIID, DR)*

[Débriefing] *« Ce que j'en pense c'est l'ambiance actuelle, en général pour tout comma ça aujourd'hui, on ferait mieux de rester dans notre lit comme ça on ne prendrait pas de risque. (rôle « président ASA », participant agriculteur de l'ASA LN, CF)*

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

Le message apporté par l'étape d'identification des risques et les résultats de la QMRA a été perçu comme potentiellement vecteur d'inquiétudes et de défiances vis-à-vis de la pratique et contribuant à une stigmatisation de la pratique :

> [Entretien *ex post*] *« Commencez par rappeler que ce n'est pas dangereux. Plus montrer l'intérêt de l'irrigation. Une personne lambda, on la met là-dedans, dès qu'elle verra un enrouleur …ça va être quelque chose … » (rôle « président ASA », participant agriculteur de l'ASA LN, CF)*

Lors de l'entretien *ex post,* une attitude assez similaire aux propos précédents a en effet été identifiée chez le participant de la société civile :

> [Entretien *ex post*] *« On a passé 3h30 à parler des risques. Donc ce serait mal venu de dire qu'utiliser des eaux de REUT y'a pas de risque (…) Quand j'irai me balader, je ferai un peu plus attention où je mettrai les pieds. Les légumes que je consommerai, je me renseignerai un peu plus sur la provenance » (rôle « observateur », participant de la FRANE, CF)*

Au-delà de l'absence d'un réel débriefing permettant de revenir sur les informations discutées pendant la session de simulation qui a pu influencer ce positionnement, il est important de préciser que ce participant était observateur de la session. Les effets de la session de simulation sur les joueurs et les observateurs peuvent être différents compte tenu de l'absence d'immersion dans la simulation pour les observateurs.

L'exercice et les résultats produits semblent exagérés par rapport aux risques « effectifs » qui, finalement, paraissent résiduels. Ces éléments ont amené des joueurs à remettre en question la pertinence de la méthodologie :

> *« Je ne suis pas sûr que ça ait apporté tant que ça à la réflexion. Ce serait plus intéressant que les gens estiment un risque entre 0 et 100% avec des résultats scientifiques, une vraie réalité. On a fait quelque chose avec des gens du métier, mais si c'est grand public c'est l'occasion de calmer leur peur. Si on leur dit qu'un riverain qui passe, le risque est de 2%, c'est beaucoup plus parlant que de dire que y'a un risque d'exposition (…) Parce que je pense que malgré tout on joue à se faire peur, parce que le risque il est infime à chaque fois » (rôle « collectivité », participant de la CAM, CF)*

Au final, ces résultats indiquent qu'une perception hétérogène des risques persistent après l'atelier pour certains joueurs. Bien que cela confirme l'intérêt de l'exercice pour faire émerger les représentations, cela questionne sur l'objectif premier de l'introduction de la QMRA qui était de pouvoir objectiver les risques.

- **Des interrogations sur les effets associés à la méthodologie**

Les joueurs des ateliers de la Drôme et de Porquerolles ont été interrogés après la simulation sur la contribution de l'atelier à renforcer la confiance dans la REUT (Figure 46) :

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

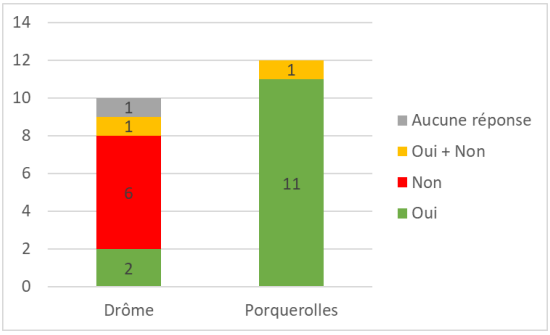


Figure 46 : Avis des joueurs sur la contribution de l'atelier à renforcer la confiance dans la REUT

Le questionnaire proposait une réponse à choix binaire. Un joueur n'a pas indiqué de choix et a accompagné sa réponse d'un point d'interrogation et deux joueurs ont indiqué les deux réponses. Pour l'atelier de la Drôme, la majorité des joueurs a indiqué une réponse négative, ce qui est l'inverse pour l'atelier de Porquerolles. Les réponses étaient indiquées sous forme de tableau où les réponses concernant l'organisation collective et l'implication d'individuelle étaient également indiquées. Un espace était réservé aux explications. L'analyse qualitative des explications a permis d'identifier une seule explication concernant la confiance :

> [Questionnaire *ex post*] *« La REUT semble beaucoup trop contraignante dans le contexte actuel » (rôle « agriculteur – tomate », participant de l'ARS n°2, DR)*

Lors de la session de simulation, ce joueur a souligné la complexité de l'outil à plusieurs reprises et a également indiqué ce positionnement lors du débriefing :

> *« Je trouve que le jeu est trop complexe. Après, c'est un outil intéressant car il intègre tous les paramètres sauf la quantité, ce qui est dommage car sur mon secteur c'est un gros enjeu. C'est trop complexe et c'est décourageant au final » (rôle « agriculteur – tomate », participant de l'ARS n°2, DR)*

Plusieurs participants ont indiqué la sensation d'un outil complexe et d'une complexification de la gestion des risques introduite par la méthodologie. Ces éléments ont pu contribuer aux réponses apportées par les participants sur la confiance vis-à-vis de la REUT.

- **Des notions paraissant complexes**

Nous avons précédemment que les notions de « *dose exposée* » et de « *DALYs* » font partie des notions les plus mentionnées par les participants. Pour le participant de l'Université de Clermont-Ferrand, l'introduction de la notion de DALYS est toutefois questionnable :

> [Entretien *ex post*] *« Vous n'avez pas eu la question mais parmi les personnes présentes dans la salle, qui est capable de définir un DALY ? Vous avez employé un terme très technique, en donnant une explication très réduite, on aurait fait un sondage je ne suis pas sûr que beaucoup de personnes vous auraient dit oui. Moi je n'aurais pas évoqué les DALY à ce niveau-là » (rôle « agriculteur - carotte », participant de l'Univ. de CF, CF)*

Au-delà des éléments que cette unité introduit (probabilité de risque, effets sur la santé…), plusieurs joueurs ont indiqué pendant la session qu'il est difficile de clairement se représenter la signification du « 10^{-6} DALYs » et de la « gravité » que pouvait représenter une non-atteinte de cet objectif. Cela a soulevé des interrogations en particulier lorsque l'objectif du 10^{-6} DALYs était presque atteint. Les valeurs proches nécessitent-elles la mise en place de mesures supplémentaires ? Au final, ces interrogations sont similaires à celles suscitées par les seuils de qualité : l'atteinte d'une concentration à 15 *E.coli* UFC/100mL au lieu de 10 UFC/100mL nécessite-t-elle de mettre en place des restrictions sur

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

les usages en interdisant l'utilisation de cette qualité pour des cultures qui nécessitent normalement la qualité A ? Nous aborderons cet élément dans la discussion.

La sensation d'une confusion à l'issue de l'atelier a été exprimée par plusieurs participants :

> [Débriefing] *« La réglementation, de savoir que telle ou telle eau sur telle ou telle culture, c'est le point positif et je garderai le point positif parce que le négatif c'est que je n'ai absolument rien compris... les log tout ça… c'est tellement loin, j'ai tellement oublié » (rôle « agriculteur – carotte », participant du PNPC n°3, PQ)*

Nous allons voir que cette sensation a également été exprimée au sujet des mesures *barrières* mais qu'au-delà de la densité des informations apportées par l'outil et les joueurs, l'absence d'un réel débriefing mais également d'un atelier supplémentaire sont également des facteurs qui y ont contribué.

3.4.1.2 Apprentissage sur la gestion des risques

- **Un apport d'informations de la part de l'outil et des autres participants**

Pour l'ensemble des trois ateliers, les joueurs ont indiqué le degré de connaissances qu'ils estimaient avoir sur les mesures de gestion des risques sur une échelle de Likert allant de 1 (faibles connaissances) à 5 (fortes connaissances) (Figure 47).

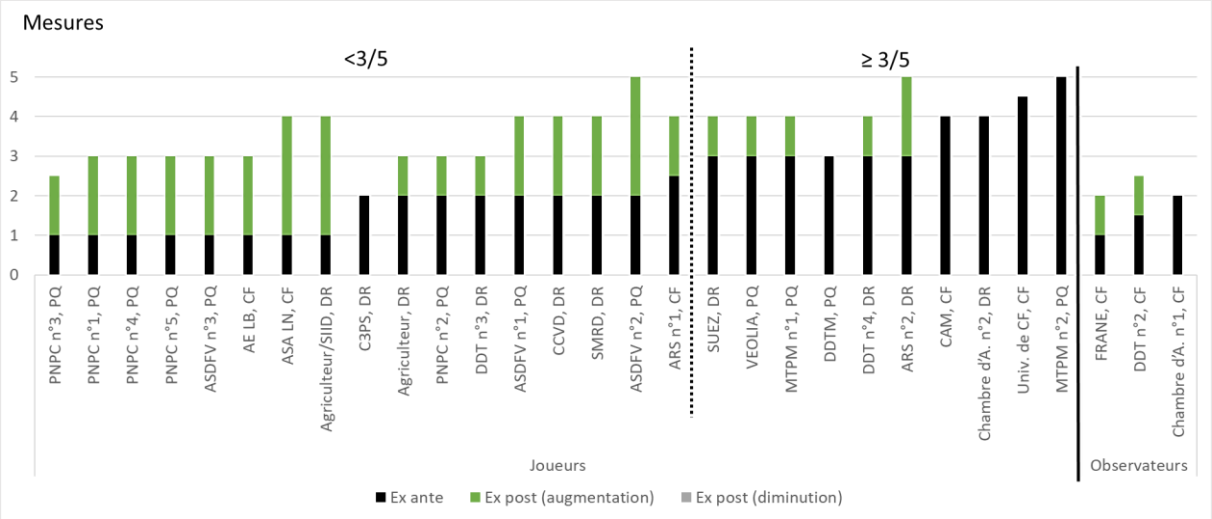


Figure 47 : Evolution des connaissances sur les mesures de gestion indiquées par les participants entre les évaluations ex ante et ex post

Comme pour la question portant sur les risques, les participants de l'atelier de Clermont-Ferrand ont été informé lors de l'entretien *ex post* de la réponse qu'ils avaient indiquée lors de l'entretien *ex ante.* Ce n'est pas le cas pour les participants des ateliers de la Drôme et de Porquerolles qui n'avaient pas accès à leurs questionnaires *ex ante*.

Tout d'abord, pour l'ensemble des trois ateliers, 21 joueurs sur 27 interrogés (soit 78 %) indiquent une note *ex post* supérieure à celle indiquée lors de l'évaluation *ex ante.* Ce nombre est bien supérieur par rapport à la question portant sur les risques (48%). Six joueurs ont indiqué une note similaire et aucun n'a indiqué une note inférieure. Aucune justification n'était demandée. Néanmoins, cette question était précédée de deux autres questions portant sur l'apprentissage : « *avez-vous appris des choses grâce à l'outil ?* » et « *avez-vous appris des choses grâce aux autres participants ?* ». L'analyse qualitative des réponses a permis d'identifier différents apports de l'outil sur les mesures *barrières :*

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

[Questionnaire *ex post*] *« Types de barrières (exemples) à mettre en place » (rôle « agriculteur – salade », participant de la DDTM, PQ)*

[Questionnaire *ex post*] *« Impact des mesures barrières et abattements bactéries en fonction des mesures » (rôle « agriculteur – noyer », participant de la DDT n°4, DR)*

[Questionnaire *ex post*] *« Intéressant d'avoir la vision avec les Logs et l'affichage du tableau : ça permet de bien visualiser l'impact des différentes mesures » (observateur de Porquerolles)*

[Entretien *ex post*] « *Ça permet de réfléchir. Des choses quand elles sont affichées dans les tableaux, elles paraissent évidentes mais on n'y pense pas » (rôle « observateur », participant de la Chambre d'A. n°1, CF)*

Ainsi, les participants indiquent que l'outil apporte :

- Des informations sur les mesures de gestion envisageables et notamment sur les mesures *barrières* et apport d'exemples concrets ;
- Des informations sur les contributions à la réduction des risques associées aux différentes mesures de gestion et également les impacts associés (économiques, organisationnels…);
- Une visualisation des contributions sanitaires et des impacts économiques associés aux mesures grâce notamment à *l'Excel* qui contribue à l'appropriation des différentes mesures et notamment les mesures *barrières.*

Les objectifs initiaux de transfert aux participants des informations rassemblées dans notre modèle d'évaluation et de gestion semblent donc avoir été atteints pour certains joueurs. Au-delà du partage d'informations, le format hybride intégrant l'ordinateur et le plateau semble important pour accompagner l'appropriation de notions associées aux mesures de gestion et la visualisation.

Les joueurs ont également un apport d'informations intéressantes sur les mesures *barrières* et les choix de gestion de la part des autres participants :

[Questionnaire *ex post*] *« Sur les pratiques culturales et les possibilités offertes pour améliorer la gestion » (rôle « agriculteur – noyer », participant de la DDT n°4, DR)*

[Questionnaire *ex post*] *« Peuvent donner un avis sur la faisabilité, le réalisme des mesures qu'on peut proposer » (rôle « agriculteur - tomate » participant de l'AE LB, CF)*

[Questionnaire ex post] « Les contraintes subies par les agriculteurs (coûts d'investissement, de fonctionnement » (rôle « agriculteur – tomate », participant de l'ARS n°2, DR)

En résumé, la présence des autres participants contribue à apporter :

- Les spécificités du terrain à considérer pour définir les choix de gestion ainsi que les contraintes associées aux différents systèmes agricoles ;
- Les pratiques qui sont déjà mises en place et qui contribuent à la réduction des risques ;
- Les conséquences, notamment économiques et organisationnelles, associées à la mise en place de certaines mesures de gestion.

Ainsi, les autres joueurs contribuent à apporter des informations qui ne sont pas nécessairement connues initialement et qui semblent, pour certaines, importantes pour la construction de la gestion des risques.

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

- **Une autre perspective de gestion des risques ?**

Un des objectifs associés à la construction d'un scénario pour chaque approche de gestion (atteinte de la qualité requise et atteinte des objectifs de qualité) était de pouvoir comparer les intérêts et les limites associés à chaque approche. La possibilité de déroger aux exigences de qualité requises sous condition de mettre en place des mesures post-traitement était déjà envisagée dans l'arrêté du 02/08/2010. Ainsi, une qualité B (≤ 10 000 *E.coli* UFC/100mL) pouvait être utilisée pour irriguer du pâturage à condition « *du respect d'un délai de dix jours en l'absence d'abattoir relié à la station d'épuration et de vingt et un jours dans le cas contraire* ». Cette possibilité n'était néanmoins pas indiquée pour les cultures alimentaires. La parution du RE 2020/741 a donc élargi cette possibilité aux cultures alimentaires. Comme nous l'avons mentionné à plusieurs reprises, cette approche suscite un certain nombre d'interrogations concernant la validité des mesures, le choix, leur mise en œuvre … C'est un changement de paradigme puisque la gestion des risques ne se fait plus uniquement au niveau du traitement. L'objectif de cette construction collective était également d'analyser les apports concernant l'approche *multi-barrières* et plus largement les apports pour la construction de filières de REUT durables.

Les méthodologies mobilisées pour recueillir ces informations ayant été différentes pour l'atelier de Clermont-Ferrand et ceux de la Drôme et de Porquerolles, nous analyserons les résultats séparément pour cet atelier.

<u>Résultats obtenus pour les ateliers de la Drôme et de Porquerolles</u>

Les avis des joueurs sur les deux approches ont été recueillis en utilisant une échelle de Likert allant de « très insatisfaisant » à « très satisfaisant » (Figure 57).

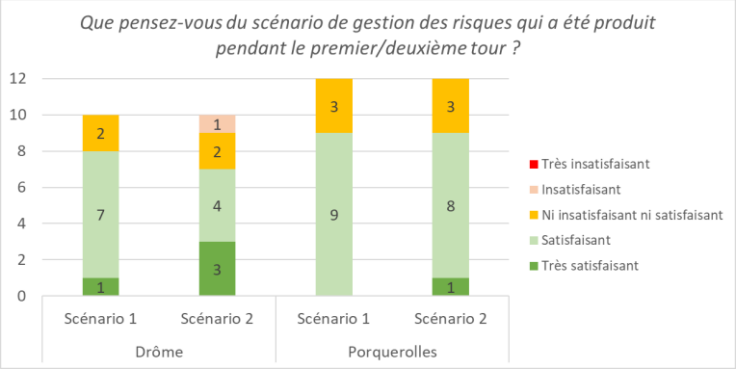


Figure 48 : Avis sur les scénarios produits par les participants de la Drôme et de Porquerolles

Globalement, les deux scénarios recueillent une majorité d'avis favorables avec un nombre un peu plus important d'avis « *très satisfaisant* » concernant le scénario n°2 (*multi-barrière*). Néanmoins, om est important de regarder ces réponses à travers une analyse qualitative des justifications indiquées sur les questionnaires. En effet, les réponses des joueurs portent sur des aspects parfois différents : i) sur le processus de construction du scénario, son déroulé et les informations qu'ils mobilisent, ii) sur le scénario construit pendant l'atelier, ou encore iii) sur l'approche de gestion de manière générale (réduction des risques, projection de sa mise en œuvre réelle…).

<u>Scénario « approche conventionnelle »</u>

L'approche conventionnelle montre les enjeux sanitaires associés aux différents usages :

[Questionnaire *ex post,* scénario 1] « *On a bien identifier la problématique par rapport aux types de cultures » (rôle « collectivité », participant de la Chambre d'A. n°2, DR)*

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

Cette approche confirme l'intérêt d'avoir un traitement suffisant au niveau de la station d'épuration (D7_INS). Différents termes appartenant au champ lexical de la réalité ont été employés concernant cette approche comme, par exemple, les termes « concret » et « crédible » :

> [Questionnaire *ex post,* scénario 1] *« Scénario crédible couvrant un maximum de possibilités » (rôle « agriculteur – maïs semence », participant de l'ASDFV n°1, PQ)*

Scénario « multi-barrières »

Le processus de construction contribue à percevoir une approche de gestion envisageable que l'approche conventionnelle :

> [Questionnaire *ex post,* scénario 2] *« Intéressant de se rendre compte qu'il n'y pas que les traitements qui permettent d'atteindre la « norme », mais d'intégrer le concept de « barrières » (rôle « agriculteur – salade », participant de la DDTM, PQ)*

L'approche *multi-barrières* associée à ce scénario permet une implication des acteurs ainsi qu'une prise en compte des contraintes du terrain et propose la mise en place de compromis :

> [Questionnaire *ex post,* scénario 2] *« Des notions de compromis » (rôle « agriculteur – pomme de terre », participant de SUEZ, DR)*

> [Questionnaire *ex post,* scénario 2] *« Bonne implication des acteurs, bonne prise en compte des contraintes » (rôle « agriculteur – tomate », participant de l'ARS n°2, DR)*

Un ensemble de mesures au-delà des procédés de traitement semblent pouvoir être mis en place. A l'issue des ateliers, les joueurs ont été invités à travers les questionnaires à indiquer les mesures de gestion qu'ils jugeaient pertinentes ainsi que celles qu'ils considéraient comme ne l'étant pas (Figure 49**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

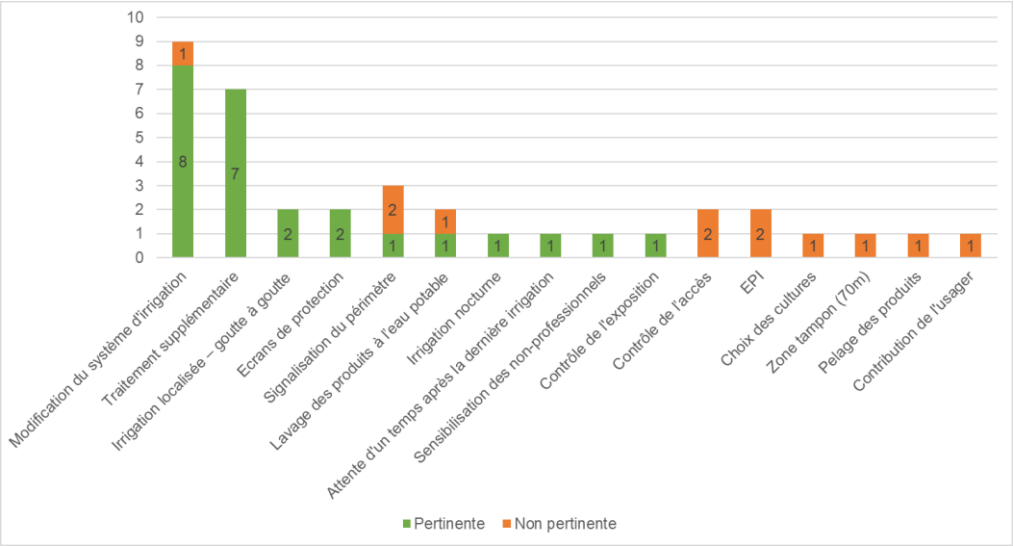


Figure 49 : Avis ex post sur les mesures proposées par l'outil (Drôme et Porquerolles)

Sur les 22 joueurs interrogés, un faible nombre de réponses a été obtenu. Ce résultat peut être expliqué par le temps très restreint qui a été accordé à l'étape d'identification collective des mesures en particulier des mesures post-traitement pour les deux ateliers. Cet élément pourrait également expliquer en partie les raisons pour lesquelles le traitement et la modification du système d'irrigation sont les mesures les plus mentionnées. Trois joueurs opérationnels n'ont pas cité de mesures en particulier car toutes les mesures leur semblaient pertinentes :

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

[Questionnaire *ex post*] *« Toutes pertinentes mais dépendent de chaque cas particulier » (rôle « agriculteur – carotte », participant du PNPC n°2, PQ)*

[Questionnaire *ex post*] *« Tout est pertinent, c'est une question d'éducation » (rôle « agriculteur – pomme de terre », participant du PNPC n°1, PQ)*

La mise en œuvre de cette approche semble plus complexe (*rôle « agriculteur – carotte », participant de la C3PS, DR*). Pour le joueur « *rôle agriculteur – noyer », participant de la DDT n°4, DR* », le scénario 2 semble difficile à imaginer en réalité (« *insatisfaisant* ») contrairement au scénario 1, qui semble le seul envisageable dans un contexte collectif où les cultures sont diversifiées (« *satisfaisant* »). D'autres termes associés à l'incertitude ou à l'abstraction ont été utilisés pour ce scénario comme « complexe » (*rôle « agriculteur – pomme de terre », participant de la DDT n°3, DR*), « non adapté à notre situation réelle » (*rôle « agriculteur – pomme de terre», participant de MTPM n°2, PQ*), « confus » (*rôle « collectivité », participant agriculteur/SIID, DR*). Un besoin de préciser les mesures déjà mises en place et celles à mettre en place a été exprimé :

[Questionnaire *ex post*, scénario 2] *« Les règles sont à préciser notamment concernant les mesures ''prises'' qui sont plutôt ''à prendre'' » (rôle « agriculteur – maïs semence», participant de MTPM n°1, PQ)*

Cette confusion entre les pratiques existantes et les nouvelles mesures a également été exprimée à plusieurs reprises pendant l'atelier, ce qui pourrait expliquer l'emploi de ces termes. Le manque de temps a également pu contribuer à cette sensation de confusion :

[Questionnaire ex post, scénario 2] « Le scénario est intéressant mais il faudrait plus de temps pour y répondre plus précisément » (rôle « agriculteur – maïs semence», participant de MTPM n°1, PQ)

En effet, le processus de construction du deuxième scénario et notamment l'étape sur les mesures *barrières* s'est déroulé dans un temps bien plus restreint que le premier scénario (<30min). Au-delà de cette sensation de confusion, certains éléments associés à cette approche ont été approchés, d'autres n'ont pas été abordés et ont laissé des questionnements en suspens. C'est le cas, par exemple, des coûts associés aux mesures *barrières* qui n'ont pas pu être pleinement explorés (*rôle « agriculteur – pomme de terre », participant de la DDT n°3, DR*). Des interrogations concernant le suivi des mesures *barrières* ont également été soulevées lors du débriefing, un élément qui n'a pas été abordé lors des ateliers :

[Débriefing] *« On peut contrôler le risque mais qui va contrôler que les mesures barrières soient véritablement mises en place à l'échelle de toutes les parcelles ? Ça c'est quand même un truc important. Qui va garantir qu'à la borne on a bien les 10^{-6} ? Pour le consommateur, c'est vachement plus sécurisant d'avoir un produit de sortie de STEP qui répond aux objectifs de qualité » (rôle « agriculteur – noyer », participant de la DDT n°4, DR)*

Le débriefing est donc un temps important pour pouvoir exprimer les questionnements en suspens. Les questionnaires ont été remplis avant que le débriefing ait été réalisé, ce qui peut expliquer certains de ces résultats.

<u>Résultats obtenus pour les ateliers de Clermont-Ferrand</u>

Les avis des participants de Clermont-Ferrand ont également été recueillis concernant les scénarios produits. La méthodologie utilisée a toutefois été différente pour cet atelier. Ainsi, les interrogés devaient analyser les scénarios selon plusieurs aspects : pertinence technique du choix ; répartition des coûts ; répartition des responsabilités ; réalisme du scénario, c'est-à-dire sa mise en œuvre dans la réalité.

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

Les réponses des joueurs et des observateurs ont été représentées séparément compte tenu des rôles occupés et donc du degré d'implication différent dans la simulation (Figure 50Figure 55 pour les joueurs et Figure 51 pour les observateurs). Au-delà des scénarios, les interrogés ont également été invité à s'exprimer au sujet des deux approches de gestion.

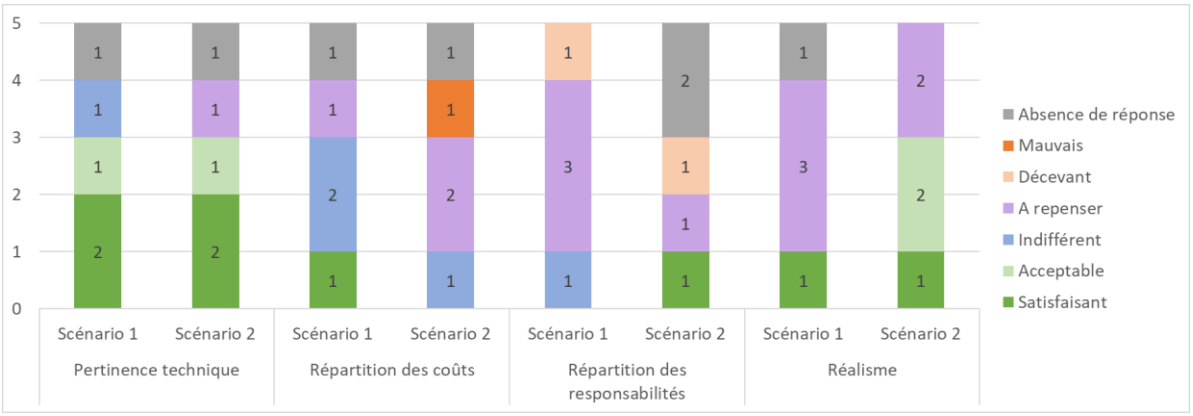


Figure 50 : Avis des joueurs de l'atelier de Clermont-Ferrand concernant les scénarios produits

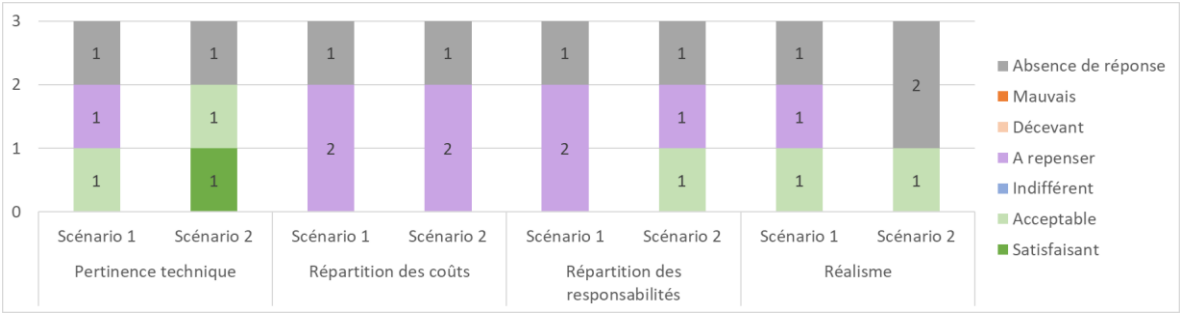


Figure 51 : Avis des observateurs de l'atelier de Clermont-Ferrand concernant les scénarios produits

Scénario « approche conventionnelle »

Concernant le premier scénario, le choix retenu semble pertinent d'un point de vue technique pour la majorité des joueurs. Pour certains, la filière retenue semble adaptée aux besoins (*rôle « collectivité », participant de la CAM, CF*, *rôle « agriculteur - carotte », participant de l'Univ. de CF, CF*). Pour d'autres, il a été difficile de se prononcer compte tenu de l'absence de connaissances (*rôle « président ASA », participant agriculteur de l'ASA LN, CF*). Le joueur ayant indiqué « indifférent » considère que les caractéristiques techniques associés aux différents procédés n'ont pas été pleinement explorées et discutées. En effet, lors de l'atelier, les éléments techniques ont très peu été abordés (par exemple, fonctionnement des lampes UV…) (*rôle « agriculteur - carotte », participant de l'Univ. de CF, CF*). Les discussions ont principalement porté sur les coûts économiques associés.

> [Entretien *ex post*, scénario 1] *« Indifférent dans la mesure où vous auriez pris tout autre système technique, j'aurais répondu exactement la même chose dans la mesure où il n'était pas justifié. Vous ne nous avez pas donné les éléments justifiant cette solution retenue (…) Il faut des arguments, des éléments qui permettent de juger quelle est la filière la plus adaptée (…) On est parti sur cette filière, pourquoi pas, mais je n'ai pas eu l'impression qu'elle a été vraiment discutée cette filière » (rôle « agriculteur – pomme de terre », participant de l'ARS n°1, CF)*

Les joueurs avaient envisagé l'intégration de la collectivité dans la prise en charge des coûts ou des responsabilités associées aux procédés de traitement. Au final, le « réalisme » de cette configuration a été remise en question par plusieurs joueurs à l'issue de l'atelier notamment concernant les coûts :

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

[Entretien *ex post,* scénario 1] « *Acceptable. Mais réaliste je ne pense pas. Je ne pense que la collectivité au regard des discussions qui avaient n'aurait pas pris en charge la filière c'est ce que laissait entendre le responsable de la station d'épuration et je pense qu'il avait complètement raison » (rôle « agriculteur – pomme de terre », participant de l'ARS n°1, CF)*

[Entretien *ex post,* scénario 1] « *Les coûts de production doivent revenir aux exploitants. On ne peut pas se permettre de demander à la collectivité de prendre en charge des tâches qui vont permettre de générer des bénéfices à un particulier » (rôle « agriculteur - carotte », participant de l'Univ. de CF, CF)*

Il est intéressant de voir que les discussions entamées sur l'intégration de la collectivité dans la prise en charge des coûts associés au traitement supplémentaire n'étaient finalement pas si éloignées de la réalité du cas de Clermont-Ferrand. En effet, la Métropole de Clermont-Ferrand va participer aux rachats de lagunes avec trois autres collectivités comme l'indique l'article de presse du journal La Montagne du 29/09/2023 :

> ***«*** *<u>Pourquoi la métropole de Clermont-Ferrand va participer au rachat des lagunes de l'ancienne sucrerie Bourdon</u>* ***:***
> *Aux côtés de trois autres collectivités, Clermont Auvergne Métropole va acquérir les lagunes de l'ancienne sucrerie Bourdon. Objectif : maintenir le fonctionnement d'un système d'irrigation des cultures "qui fait référence". (…) Or si le groupe Cristal Union avait annoncé en 2022 des discussions avancées pour la reprise de l'ancienne sucrerie Bourdon avec sept porteurs de projets,* ***l'ASA n'a pas la capacité financière*** *de racheter ces lagunes au groupe coopératif sucrier. Sans ce lagunage,* ***l'activité agricole de ces agriculteurs serait donc mise en péril****, argue la métropole de Clermont-Ferrand.* ***Quatre collectivités*** *ont donc décidé d'agir en portant l'acquisition de ces lagunes, pour un montant total de 2,7 millions d'euros. Ce coût sera partagé entre la Région (1,2 million d'euros), le Département (623.000 €), la métropole de Clermont-Ferrand (415.000 €) et la communauté d'agglomération Riom Limagne et Volcans (415.000 €). (…) En contrepartie, l'ASA de la Limagne Noire a pris certains* ***engagements*** *pour les dix prochaines années,* ***autour de la conversion en bio****, des* ***économies d'eau*** *(outils de pilotage de l'irrigation, etc.),* ***du partage de l'eau*** *sur le secteur ou avec la métropole (pour le lavage de la voirie par exemple) ou encore de la gestion écologique des bassins avec la Ligue de protection des oiseaux (LPO) (…) Pourquoi cette acquisition a soulevé des interrogations ? Le dispositif n'est pas remis en cause, il est même salué par les élus. Mais Luc Levi-Alvarès (groupe des Non inscrits) a exprimé plusieurs "inquiétudes" : « Qui va* ***entretenir ces lagunes*** *? Et comment pourra-t-on vérifier que l'ASA de la Limagne Noire va respecter ses engagements ? », a demandé l'élu de Gerza » (Cesbron, 2023)*

Cet article indique également la présence de questionnements des élus concernant l'entretien des lagunes par les agriculteurs, des questionnements qui font écho à ceux identifiés pendant les entretiens *ex ante.* Plusieurs joueurs ont exprimé la sensation que cette répartition avait été au final peu discutée et qu'elle avait été tranchée par certains joueurs (*rôle « président ASA », participant agriculteur de l'ASA LN, CF*, *rôle « agriculteur – pomme de terre », participant de l'ARS n°1, CF*). Ainsi, ces résultats indiquent un consensus limité autour du scénario produit, un résultat qui semble plutôt prévisible compte tenu du temps restreint pour construire le scénario. Les joueurs et également les observateurs n'ont néanmoins pas pu revenir sur ces désaccords après l'atelier et sont repartis avec le sentiment d'une décision non-partagée :

[Entretien *ex post,* scénario 1] *« La CAM, j'ai bien vu qu'il voulait que la responsabilité soit portée sur l'utilisateur et pas le producteur, moi je ne suis pas d'accord là-dessus » (rôle « observateur », participant de la Chambre d'A. n°1, CF)*

<u>Scénario « approche multi-barrières »</u>

Lors des entretiens *ex ante,* la possibilité introduite par le RE 2020/741 concernant la mise en place de mesures *barrières* au-delà du traitement si la qualité requise n'était pas atteinte a été présentée aux

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

participants de Clermont-Ferrand. L'objectif était de recueillir leur avis concernant cette approche avant l'atelier.

Cette approche semble intéressante pour plusieurs raisons. Tout d'abord, elle paraît plus adaptée aux contraintes et aux attentes du terrain contrairement aux exigences actuelles, parfois inapplicables sur le terrain. Le mot « pragmatique » a ainsi été employé par plusieurs participants :

> [Entretien *ex ante*] *« Pour moi c'est une mesure qui est de bon sens et qui s'adapte, qui relève du cas par cas. Plus on sera dans une approche cas par cas avec des dangers bien identifiés et si on met en place les bonnes barrières de protection, plus on sera protecteur pour tous les individus » (rôle « agriculteur - carotte », participant de l'Univ. de CF, CF)*

> [Entretien *ex ante*] *« C'est très pragmatique et c'est très bien (..) on leur demande des usines à gaz pour, finalement, que personne ne l'applique (…) des trucs pragmatiques, moi je trouve que c'est quand même pas mal » (rôle « observateur », participant de la DDT n°2, CF)*

Elle semble plus proactive et adaptative notamment vis-à-vis de l'apparition de nouveaux risques sanitaires. Elle pourrait également permettre de pallier à d'éventuels dysfonctionnements au niveau de la filière de traitement (*rôle « collectivité », participant de la CAM, CF*). Les participants ont également indiqué que cette approche encourage l'engagement et la responsabilisation ce qui semblent être des aspects intéressants en particulier pour assurer une gestion effective des risques :

> [Entretien *ex ante*] *« Avec ces approches on est dans une démarche de responsabilisation de tous les acteurs, les plans de gestion, les Water Safety Plan de l'OMS sont dans cette idée. Plus on aura une responsabilisation de tous les acteurs, plus on peut espérer que les choses sur le terrain seront faites au mieux pour prendre en compte tous les dangers présents » (rôle « agriculteur - carotte », participant de l'Univ. de CF, CF)*

Il est néanmoins nécessaire de préciser les mesures qui pourraient être envisagées. Des informations doivent être apportées concernant les impacts associés notamment en terme d'organisation mais aussi de gestion des risques.

> [Entretien *ex ante*] *« C'est un sujet que je ne maîtrise pas. Si ce n'est d'avoir participé à quelques réunions. Ou alors entendu des choses, mais voilà, je pense que je ne pourrais pas en parler. D'où l'intérêt. Voilà, je suis en attente de l'outil. Ça montre que ça répond à un besoin aussi » (rôle « observateur », participant de la DDT n°2, CF)*

Ces informations seront nécessaires pour qu'elles puissent être validées par les services instructeurs :

> [Entretien *ex ante*] *« Ces mesures-là, il faut qu'elles soient validées par l'ensemble. Et l'administration également. Ça fait partie de l'évaluation des risques et de la présentation du dossier » (rôle « agriculteur – pomme de terre », participant de l'ARS n°1, CF)*

Mais aussi par les acteurs opérationnels :

> [Entretien *ex ante*] *« Ce serait dommage de s'empêcher de faire certaines cultures. Mais il faut voir la contrainte en terme de travail parce que c'est toujours pareil …» (rôle « président ASA », participant agriculteur de l'ASA LN, CF)*

A l'issue de l'atelier, les participants ont indiqué que ces besoins ont été partiellement remplis. La construction du deuxième scénario est perçue comme plus individuelle. Les choix concernant les mesures *barrières* supplémentaires semblent moins construits par rapport à des objectifs de réduction des risques sanitaires mais plutôt par rapport aux intérêts et aux ressentis de chacun. Ces critères sont importants pour définir les mesures à mettre en place, mais ils doivent être accompagnés d'informations scientifiques pour valider les mesures choisies et la mise en place de cette approche par les autorités. Compte tenu du temps restreint associé au choix des mesures *barrières* supplémentaires,

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

une QMRA n'a pas pu être réalisée pour accompagner le choix des joueurs. Cela peut être une des raisons expliquant cette sensation de choix construit sur du ressenti plutôt que des informations scientifiques. De plus, l'absence d'un réel débriefing et d'un atelier supplémentaire pour apporter ces éléments a également pu contribuer à cette sensation :

> [Entretien *ex post*] *« Bon sens et réflexion personnelle. Chacun était avec son expérience et sa vision. C'est un des critères de choix. Mais nos choix n'étaient pas appuyés sur des argumentaires scientifiques, plutôt sur du ressenti. Il faut expliquer les avantages et les inconvénients de chaque mesure. Car là, j'ai eu l'impression d'un choix au doigt mouillé. Si vous voulez diffuser l'outil, il faut apporter le maximum d'information. » (rôle « agriculteur - carotte », participant de l'Univ. de CF, CF)*

> [Entretien *ex post*] *« Vous l'avez dit mon outil est basé sur des données scientifiques, mais c'est ces données là qu'il va falloir nous présenter plus que finalement les actions ou les barrières mises en place. Ça c'est un gros travail que vous avez certainement fait sur la partie scientifique mais que nous on n'a pas vu. C'est là où moi je suis un peu resté sur ma faim (…) la partie qui m'intéressait n'a pas été présentée » (rôle « agriculteur – pomme de terre », participant de l'ARS n°1, CF)*

Les mesures *barrières* retenues par les joueurs semblent plutôt « *réalistes* » pour la plupart des joueurs (par exemple, *rôle « collectivité », participant de la CAM, CF*, *rôle « président ASA », participant agriculteur de l'ASA LN, CF*, *rôle « agriculteur - tomate » participant de l'AE LB, CF*). Néanmoins, certains aspects restent flous comme, par exemple, les garanties de sa mise en œuvre :

> *[Entretien ex post] « Y'a des solutions comme la cuisson, le lavage on est jamais garanti que ça va être appliqué ça. C'est une recommandation mais comment être sûr que les habitants vont laver correctement ? Pomme de terre, on ne peut pas les manger crues mais le lavage. Y'a des solutions qui ne me paraissent pas forcément réalistes, où on a pas de garantie » (rôle « agriculteur - tomate » participant de l'AE LB, CF)*

En effet, la gestion est appliquée à une échelle plus individuelle que pour les procédés de traitement. En reposant sur l'individu, cela confère un caractère « *trop variable* » à cette approche :

> [Entretien *ex post*] *« En fonction de l'agriculteur, de son âge, de la culture qui cultive, de la surface, de sa sensibilisation au problème … Si vous tombez sur quelqu'un de 70 ans qui n'en a rien à foutre des normes vous aurez du mal à lui faire entendre raison, il fera ce qu'il a à faire et basta » (rôle « collectivité », participant de la CAM, CF)*

Pour l'agriculteur membre de l'ASA, cette approche semble se traduire par un ajout de contraintes :

> [Entretien *ex post*] *« Ça va encore faire des charges de travail pour les agriculteurs » (rôle « président ASA », participant agriculteur de l'ASA LN, CF)*

Cette perception de l'approche *multi-barrières* comme une approche ajoutant des contraintes ou complexifiant la gestion a été partagée par plusieurs participants. Ce résultat indique le besoin de mieux travailler cette approche. En effet, nous avons montré qu'un certain nombre de mesures *barrières* sont déjà en place à travers les pratiques et les équipements, elles sont donc « effectivement » appliquées notamment par les agriculteurs. Il est possible que compte tenu de la densité des informations mais aussi du temps restreint, une certaine confusion a pu être faite entre les mesures *barrières* existantes et celles à mettre en place. Cela expliquerait, en partie, la perception de cette approche comme étant « variable » ou représentant un ajout de contraintes. Concernant les mesures à mettre en place, certaines sont habituelles pour les agriculteurs puisqu'elles sont déjà appliquées pour d'autres usages que la REUT :

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

[Entretien *ex post*] *« Le délai c'est connu par les agriculteurs, ce sont des pratiques qui sont usuelles donc ça peut passer » (rôle « agriculteur - carotte », participant de l'Univ. de CF, CF)*

Comme pour l'approche « conventionnelle », des questionnements restent donc en suspens en particulier autour de la responsabilité. Cette approche semble être une « *dispersion des responsabilités* » qui soulève des interrogations pour les acteurs institutionnels pour la validation des projets mais aussi pour les acteurs opérationnels. En effet, la responsabilité des acteurs « post traitement », et notamment de l'agriculteur, est engagée. Si une gestion suffisante des risques n'est pas prouvée, c'est-à-dire équivalente à une qualité A dans le cas des cultures alimentaires, cet engagement semble être une prise de risque :

[Entretien ex post] « Le multi-barrière doit permettre d'atteindre la qualité A. Je me mets dans la peau d'un agriculteur, ma responsabilité est engagée à temps plein donc je ne prendrai pas le risque. A partir du moment où il y a un vide juridique, il prend des risques » (rôle « agriculteur - carotte », participant de l'Univ. de CF, CF)

Au final, une gestion en amont par la mise en place de procédés de traitement apparaît comme plus « *sécurisante* » plutôt que de dépendre de mesures dont la mise en place et l'efficacité semblent être aléatoires (*rôle « observateur », participant de la Chambre d'A. n°1, CF*). Néanmoins, il est intéressant de voir que ces interrogations sur la responsabilité sont également partagées pour la gestion actuelle des risques basée sur le traitement. C'est le cas notamment des résultats des analyses microbiologiques et de l'identification de dépassement des concentrations en sortie des lagunes de maturation ou au niveau des points d'usage :

[Entretien ex post, scénario 1] « Quand on a les réunions de suivi, ce n'est pas toujours simple. Quand les valeurs en microbiologie sont plus élevées, en réunion de suivi en terme de responsabilité ce n'est pas toujours clair » (rôle « agriculteur - carotte », participant de l'Univ. de CF, CF)

Nous verrons dans la section suivante que les exigences de qualité sont remises en question et qu'elles doivent être accompagnées de la mise en place de mesures *barrières.*

3.4.1.3 Apprentissage sur le cadre réglementaire

Lorsqu'interrogés avant l'atelier sur la contribution de l'encadrement réglementaire à la gestion des risques pour la REUT, la majorité des joueurs de la Drôme et de Porquerolles (18 participants sur 22) ont répondu par une affirmation (Figure 52).

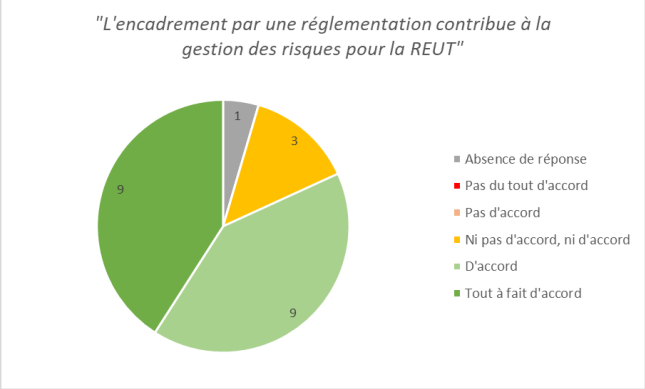


Figure 52 : Avis ex ante sur la contribution de l'encadrement par une réglementation pour la gestion des risques liés à la REUT (Drôme et Porquerolles)

Un joueur ne s'est pas prononcé et trois joueurs ont exprimé un avis modéré dont un participant institutionnel *(rôle « agriculteur – tomate », participant de l'ARS n°2, DR).* Aucune justification n'a été

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

demandée à travers les questionnaires, bien qu'il aurait été intéressant de connaître les raisons de ce positionnement. Néanmoins, ces résultats indiquent que le cadre réglementaire est perçu comme un élément contribuant à la gestion des risques. Ces résultats font écho à ceux de l'analyse de la perception des risques que nous avons présentée dans la partie précédente. La présence d'un cadre réglementaire y était indiquée comme un élément contribuant à gérer les risques et à renforcer la confiance dans la pratique.

Lors des entretiens *ex ante* réalisés à Clermont-Ferrand, le cadre réglementaire a été mentionné à plusieurs reprises comme un élément nécessaire, qui contribue à orienter les décisions. En effet, l'encadrement réglementaire donne un cadre concernant ce qu'il est possible de faire et ce qui doit être fait. Néanmoins, le cadre réglementaire est également considéré comme un frein à la pratique et en décalage avec les réalités et les besoins du terrain :

> [Entretien ex ante] *« Je pense que c'est le cadre règlementaire qui est quand même un frein. Et ça ne va pas répondre au besoin, par exemple, des petites collectivités, des besoins ponctuels qu'on pourrait avoir et que, nous, on commence à avoir un petit peu. Des besoins auxquels on répond « ben non, aujourd'hui ce n'est pas destiné à votre utilisation » (rôle « observateur », participant de la DDT n°2, CF)*

> [Entretien ex ante] *« Lourdeur administrative, créer des règles là où y'a pas besoin d'en avoir, mettre des contraintes alors qu'il n'y en a pas besoin. C'est ce qu'on ressent un peu et ce qu'on vit dans toutes les autres instances. (…) On se retrouve avec des personnes qui n'y connaissent rien et c'est imposé, sans bon sens, sans comprendre. (….) C'est ce qu'on vit aujourd'hui. On a des règles, il faut les suivre, intelligentes ou pas. C'est plus souvent pas intelligent mais bon…C'est des personnes qui sont dans des bureaux qu'il faut occuper … c'est méchant ce que je dis mais c'est un ras le bol. On s'en sort tout seul, y'a jamais eu de problème » (rôle « président ASA », participant agriculteur de l'ASA LN, CF)*

Compte tenu notamment des récents changements réglementaires, certains participants, notamment institutionnels, sont en attente d'informations concernant les exigences sanitaires :

> *[Entretien ex ante] « Pour nous c'est une découverte. On l'évoquera peut-être après mais on a une réglementation qui est en pleine évolution. Et on est surtout dans l'attente des textes et des directives du ministère (…) on s'appuie sur des textes aujourd'hui qui sont en discussion … Quand on aura tous les éléments… » (rôle « agriculteur – pomme de terre », participant de l'ARS n°1, CF)*

Plusieurs participants institutionnels ont indiqué un besoin d'informations et d'accompagnement à ce sujet. Nous allons voir que le dispositif y a en partie répondu.

- **L'apport d'informations sur le cadre réglementaire**

Comme pour les thématiques précédentes (« risques » et « mesures de gestion »), les joueurs ont indiqué leur degré de connaissances concernant la réglementation sur une échelle de Likert (de 1 = faibles connaissances à 5 = fortes connaissances) (Figure 53). Cette question n'a pas été demandée aux participants de Clermont-Ferrand. Pour ce premier atelier, nous avions choisi d'aborder la réglementation sous forme d'une question ouverte.

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

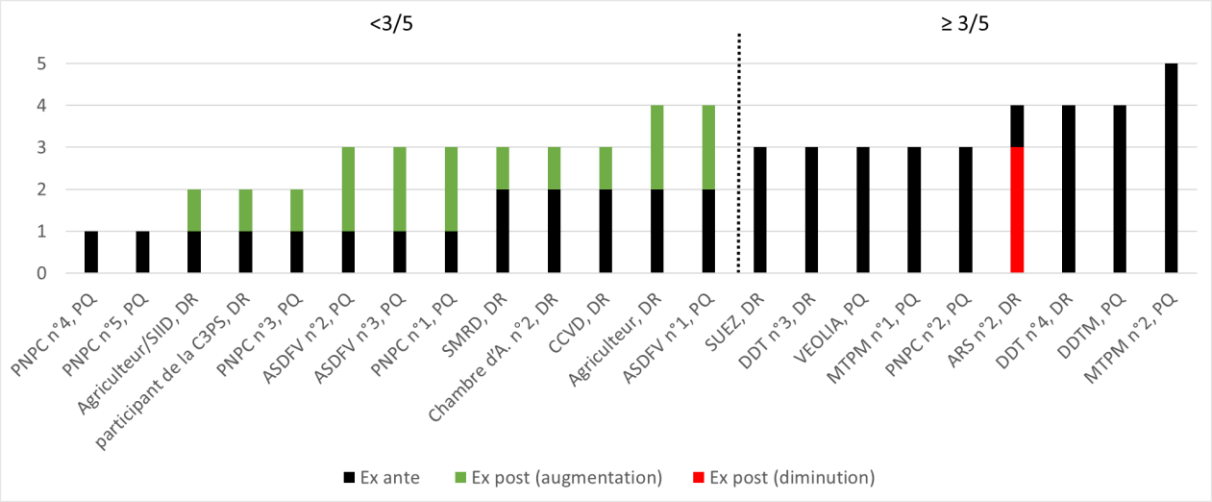


Figure 53 : Évolution du degré de connaissances sur réglementation indiqué par les participants (Drôme et Porquerolles)

Pour les ateliers de Porquerolles et de la Drôme, onze joueurs sur 22 (50%) ont indiqué une note *ex post* supérieure à celle *ex ante* et dix joueurs ont indiqué qu'il était resté au même niveau. L'ensemble des joueurs ayant indiqué une note *ex post* supérieure avait indiqué une note *ex ante* strictement inférieure à 3/5. Un joueur (institutionnel) a indiqué une note *ex post* inférieure. Toutefois, lors de la question concernant l'apprentissage permis par l'outil, ce joueur a indiqué avoir appris des éléments concernant le cadre réglementaire :

> [Questionnaire *ex post*] *« les différentes modalités de gestion des risques sanitaires (traitement, mesures barrières) » (rôle « agriculteur – tomate », participant de l'ARS n°2, DR)*

Nous verrons ultérieurement que ce joueur également indiqué à plusieurs reprises pendant l'atelier et le débriefing une impression de complexité apportée par le dispositif concernant la gestion des risques. Cette impression est peut-être une des raisons pour l'indication d'une note *ex post* inférieure.

Pour l'ensemble des trois ateliers, les joueurs ont indiqué différents apports à l'issue de l'atelier concernant la réglementation. Par exemple, les exigences de qualité à atteindre pour les différents usages est un apport qui a été cité à plusieurs reprises notamment par des acteurs opérationnels. C'est le cas du joueur de l'atelier de Clermont-Ferrand membre de l'ASA LN :

> [Entretien *ex post*] *«* Les *différentes qualités, je ne savais même pas. La norme et tout, je n'étais pas vraiment renseigné avant de venir » (rôle « président ASA », participant agriculteur de l'ASA LN, CF)*

Comme indiqué dans la deuxième partie, ce joueur avait également indiqué ne pas être au courant des risques associés à la REUT. Ces éléments indiquent que les agriculteurs ne sont pas toujours au courant des risques associés à la REUT mais aussi du cadre réglementaire. L'atelier contribue également à mettre en lumière les impacts associés à la réglementation et la difficulté d'appliquer certaines exigences :

> *[Entretien ex post] « Je ne pensais pas que c'était aussi compliqué, que la réglementation orientait aussi fort les choix » (rôle « observateur », participant de la Chambre d'A. n°1, CF)*

Si des interrogations persistent sur l'approche *multi-barrières,* des participants ont néanmoins remis en question les critères de qualité exigés par le cadre réglementaire. Lors des entretiens *ex ante* menés pour l'atelier de Clermont-Ferrand, les participants s'étaient exprimé sur la pertinence de définir différentes qualités selon les usages. Adapter la qualité selon l'usage semble cohérent. En effet, les cultures n'ont pas les mêmes niveaux de risques qui dépendront de leur destination ou de leurs

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

caractéristiques. Cependant, des interrogations ont été exprimées sur ces niveaux de qualité : Comment ont-ils été définis ? Pourquoi les exigences requises par l'arrêté de 2010 et le RE 2020/741 sont-elles différentes ? Quelle sont les raisons de ce renforcement ? Est-ce réellement justifié d'un point de vue sanitaire ?

> [Entretien ex ante] « *Est-ce que c'est justifié ? parce que la qualité n'est pas A et qu'on a une qualité B, l'aliment est non consommable ou pas ? Moi je n'en sais rien. A priori pourquoi bloquer? Il me faut des éléments pour dire: « on bloque, on bloque pas ». Mais d'emblée, non je ne suis pas d'accord. Parce que là, aujourd'hui, on voit bien qu'avec le règlement européen, une qualité que nous on avait, qui était A, a été déclassée maintenant en B de ce que j'ai compris. Finalement, la qualité B, elle était tout à fait satisfaisante pour nous. Donc d'emblée, je ne suis pas d'accord. J'ai besoin qu'on montre pourquoi ce ne serait pas possible (…) Parfois, on veut se mettre des limites très élevés pour finalement un résultat qui n'est pas à la hauteur » (rôle « observateur », participant de la DDT n°2, CF)*

Ces renforcements et les contraintes associées semblent en contradiction vis-à-vis des injonctions politiques encourageant le développement de la pratique :

> [Entretien *ex ante*] *« Mais c'est vrai qu'on nous a vendu la REUT pour dire: ça va être la solution un peu miracle et tout ça, et non, en fait, on se rend compte que ce n'est pas la solution miracle » (rôle « observateur », participant de la DDT n°2, CF)*

D'autant plus que, comme indiqué par le participant de la DDT, la pratique n'est pas nouvelle et que les cas existants comme ceux de Clermont-Ferrand ont montré des preuves de leur fonctionnement et d'une gestion suffisante des risques. Des exigences trop poussées risquent de ne pas pouvoir être appliquées ou bien être contournées. Les conséquences sanitaires pourraient alors être plus importantes qu'avec des exigences moins strictes :

> *[Entretien ex ante] « Renforcer, mettre en place des mesures réglementaires de plus en plus contraignantes pour moi, ce n'est pas la meilleure approche. Parce qu'on arrivera un moment où il ne sera pas possible de les faire respecter. Et il peut y avoir des dérives à ce niveau-là qui seront plus dramatiques que ce qui existait auparavant avec des mesures plus allégées » (rôle « agriculteur - carotte », participant de l'Univ. de CF, CF)*

Cette remarque rejoint l'introduction des directives de l'OMS de 2006 :

> *« Des normes trop strictes peuvent ne pas être applicables sur la durée et paradoxalement conduire à une moindre protection sanitaire car elles risquent d'être considérées comme impossibles à atteindre dans les conditions locales et donc d'être ignorées »*

Lors des entretiens *ex post,* l'avis des participants sur cet élément a de nouveau été demandé. L'ensemble des participants interrogés (huit sur huit, incluant les observateurs) ont indiqué que définir des critères de qualité selon les usages leur semblait être une approche toujours adaptée. Néanmoins, les niveaux requis ont été remis en question, en particulier celui de la qualité A exigé notamment pour les cultures alimentaires. Plusieurs éléments ont contribué à cette remise en question : absence d'exigences réglementaires concernant la qualité microbiologique du rejet de la station d'épuration (hors zones sensibles), absence d'exigences de qualité requises pour l'irrigation agricole qui prélève dans ce milieu en aval, qualité exigée pour les eaux de baignade … La comparaison des exigences imposée à la REUT avec celles exigées pour les autres usages a contribué à une remise en question des exigences :

> *[Entretien ex post] « Là où ça va dans votre sens, si on regarde les exigences sanitaires pour d'autres usages, je trouve que la réglementation a été loin. Trop loin c'est une évidence (…) On a mis des exigences très fortes, on n'a pas cette qualité sur une rivière aujourd'hui » (rôle « agriculteur – pomme de terre », participant de l'ARS n°1, CF)*

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

La construction du deuxième scénario a également contribué à la remise en question des exigences de qualité. Par exemple, l'identification des populations exposées, et notamment du personnel d'irrigation, des riverains et des passants pour les parcelles « maïs semence », ont suscité des interrogations concernant les risques associés à l'utilisation d'une qualité D et leur gestion :

> [Débriefing] *« Je reviens dans la peau de l'agriculteur 1 (nb : maïs semence) et je me dis « comment la réglementation elle est foutue ? ». Moi je peux irriguer du maïs, y'a pas de problème mais au final je me rends compte que c'est très compliqué et que j'ai des impacts sur la santé humaine autour de moi alors que j'ai l'autorisation d'arroser avec des EUT ma culture » (rôle « agriculteur – maïs semence », participant du SMRD, DR)*

Au final, l'utilisation de qualités moins poussées comme la qualité B pourrait assurer une gestion des risques suffisantes, même pour des cultures alimentaires consommées crues pour lesquelles une qualité A est requise:

> [Entretien *ex post*] *« Oui. C'est la plus sécuritaire. Mais j'ai quand même l'impression qu'une qualité B permet de faire beaucoup de choses, même avec des carottes » (rôle « collectivité », participant de la CAM, CF)*

En montrant la contribution non-négligeable de pratiques existantes et des équipements utilisés pour réduire les risques, il est probable que l'étape d'évaluation des risques et de l'utilisation du modèle QMRA, a également contribué à remettre en question la nécessité d'atteindre une qualité aussi poussée. En effet, les résultats indiquaient que les objectifs liés à la santé étaient atteints pour certaines populations exposées, et notamment les consommateurs, sans la mise en place de procédés de traitement avancés. Au final, si définir des exigences de qualité semble être nécessaire, il est également important qu'elles soient applicables et réalistes par rapport aux risques effectifs et au cadre opérationnel :

> [Entretien ex post] *« Toujours adaptée. Il faut bien que ce soit cadré mais après il faut que ces normes soient acceptables et réalisables » (rôle « président ASA », participant agriculteur de l'ASA LN, CF)*

3.4.2 Des interrogations sur la portée opérationnelle des résultats et du dispositif

3.4.2.1 Un format intéressant pour accompagner la construction collective et favoriser les apprentissages relationnel et collaboratif

Dans un premier temps, nous nous intéresserons au contexte dans lequel s'est déroulé les ateliers notamment à travers les participants mobilisés et leur positionnement vis-à-vis de la REUT. Pour le cas de Clermont-Ferrand, nous tenterons d'analyser les liens préexistants entre les participants ainsi que les perceptions mutuelles et d'identifier d'éventuels besoins. Dans un second temps, nous verrons que le format « jeu de rôles » contribue à la collaboration entre les joueurs pour construire les scénarios ainsi qu'à l'apprentissage. Dans un troisième temps, nous verrons que malgré ces apports, des interrogations concernant la pertinence de format ont été soulevées.

- **Un contexte en apparence plutôt propice à la construction collective**

Les acteurs opérationnels représentaient la majorité des joueurs des ateliers de Porquerolles et de la Drôme. Les profils étaient un peu plus diversifiés pour l'atelier de Clermont-Ferrand. Certains acteurs

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

comme les acteurs de la société civile et les acteurs scientifiques étaient peu représentés compte tenu, notamment, des objectifs à la session de simulation (cf Chapitre 2, section 2.3.2) (Figure 54).

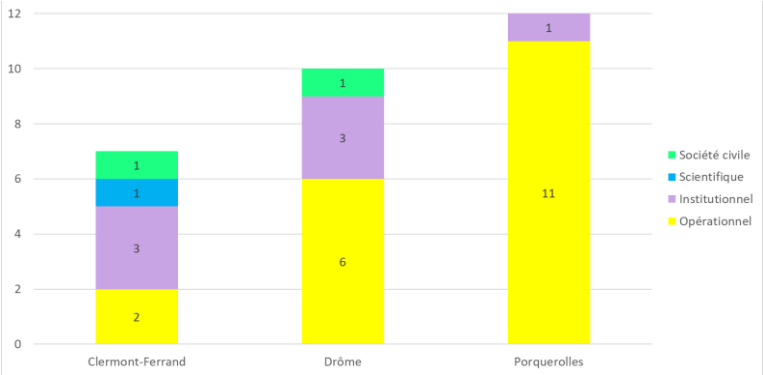


Figure 54 : Répartition des joueurs pour les trois ateliers

Ces acteurs sont impliqués à différents maillons de la filière de REUT (traitement, utilisation, consommation…), à différents niveaux (local, macro…) et pour différents objectifs (fonctionnement technique, instruction du dossier, appui scientifique…). Certains acteurs sont donc amenés à plus ou moins collaborer. De plus, pour ces acteurs, la REUT peut présenter des bénéfices direct (utilisation pour l'irrigation…) et indirect (consommation de produits alimentaires, substitution des ressources sensibles…) mais peut également ne pas en présenter ou bien présenter des inconvénients (sanitaire, politique, économique...). L'ensemble des éléments que nous venons de mentionner font partie des facteurs d'influence dans la perception des risques et de la gestion mais aussi des autres parties prenantes. Pour analyser la contribution d'un processus participatif, et dans notre cas de la simulation participative et du jeu de rôles pour accompagner la construction collective, l'analyse du contexte est un élément important (Hassenforder *et al.,* 2015). Pour cela, il nous paraissait intéressant d'analyser le positionnement des joueurs vis-à-vis de la REUT (est ce que certains sont opposés à la REUT ?) et leur perception des autres (est-ce que des relations et/ou des tensions préexistent ?).

- **Positionnement vis-à-vis de la REUT**

A travers les questionnaires *ex ante*, les joueurs des ateliers de la Drôme et de Porquerolles ont indiqué leur positionnement vis-à-vis de la réutilisation des eaux usées à partir d'une échelle de Likert allant de « *très défavorable* » à « *très favorable* » (Figure 55).

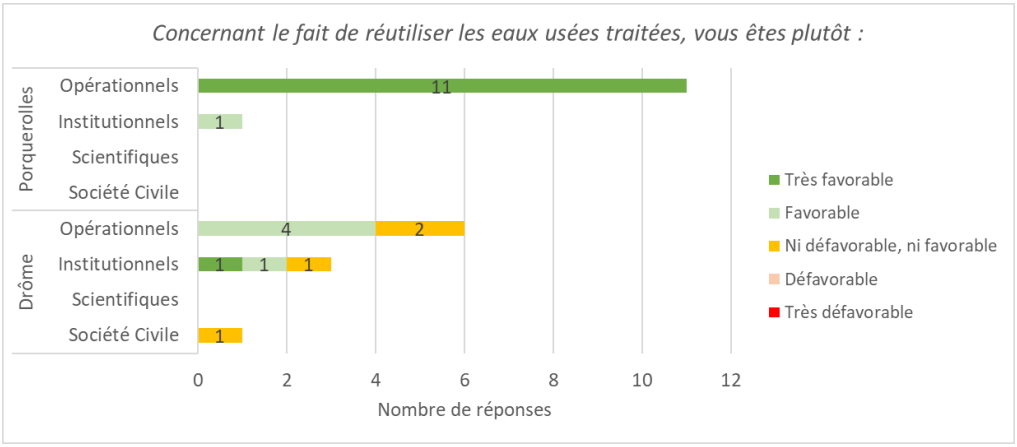


Figure 55 : Positionnement ex ante des participants vis à vis de la REUT pour les ateliers de la Drôme et de Porquerolles

Les résultats indiquent que les ateliers se sont déroulés dans un contexte où les joueurs étaient majoritairement « *favorables* » voir « *très favorables* » à la pratique. C'est particulièrement le cas à

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

Porquerolles où 90 % (11 joueurs sur 12) étaient « *très favorables* » à la pratique. Tout d'abord, la REUT permet d'assurer l'irrigation des vergers de conservation (*PNPC n°4, PQ*). Cette pratique s'inscrit dans des enjeux d'économie circulaire et de limitation des pressions sur les ressources conventionnelles, des enjeux importants compte tenu du contexte insulaire, de l'impact du flux touristique et du changement climatique (*MTPM n°1, PQ*, *PNPC n°2, PQ*, *ASDFV n°2, PQ*, *DDTM, PQ*). Les eaux traitées par les lagunes sont ainsi valorisées au lieu d'être rejetées vers la mer (*ASDFV n°1, PQ*).

Dans le cas de la Drôme, les avis étaient un peu plus modérés puisque 40% (4 joueurs sur 10) ont indiqué un positionnement neutre vis-à-vis de la pratique. Le contexte de l'atelier de la Drôme était différent de celui de Porquerolles. C'est un projet en construction qui n'a pas encore fait ses preuves contrairement au cas de Porquerolles. Les profils des joueurs présents sont plus variés pour le cas de la Dôme, contrairement à Porquerolles où les acteurs opérationnels travaillant au PNPC ou faisant partie de l'association en charge des vergers composent l'atelier à plus 90%. Pour les joueurs de l'atelier de la Drôme ayant indiqué une réponse « *favorable* » ou « *très favorable* », les EUT permettent de répondre aux besoins d'irrigation et aux enjeux de raréfaction de la ressource mais aussi d'économie circulaire et de valorisation (*agriculteur/SIID, DR*, *agriculteur, DR*, *Chambre d'A. n°2, DR*, *C3PS, DR*, *DDT n°3, DR*). Les participants ayant exprimé un positionnement neutre indiquent que les « *contraintes climatiques imposent cette voie* » (*ARS n°2, DR*). La pratique n'est donc pas nécessairement souhaitée. Des besoins ont été exprimés comme la nécessité d'une « *évaluation des impacts, risques, bénéfices pour chaque cas* » (*SUEZ, DR*). Si ce joueur ne s'est pas exprimé après l'atelier sur une éventuelle réponse de l'outil à ce besoin, ce genre d'évaluations semble néanmoins importante pour se positionner vis-à-vis de la pratique. Le joueur de la société civile se positionne de manière neutre : « *pas une solution miracle mais une solution parmi d'autres à étudier et à adapter à chaque contexte* (…) *prudence sur le soutien d'étiage des rejets aux cours d'eau* » (*SMRD, DR*).

Dans le cas de Clermont-Ferrand, une autre méthodologie a été utilisée. Les joueurs et les observateurs devaient indiquer les éventuels intérêts et limites qu'ils percevaient vis-à-vis de la REUT. Les intérêts de la pratique sont nombreux : maintien des usages agricoles (*ASA LN, CF*), valorisation des eaux usées (*CAM, CF*), apport d'un traitement supplémentaire avant qu'elles repartent dans le milieu naturel (*agriculteur de l'ASA LN, CF*), substitution des ressources conventionnelles (*ARS n°1, CF*, *DDT n°2, CF*, *Chambre d'A. n°1, CF*), limiter le rejet dans le milieu naturel (*AE LB, CF*) … Il est intéressant de voir que les intérêts soulevés sont en lien avec les préoccupations des acteurs concernés. Concernant les limites, plusieurs attitudes ont été identifiées. Si pour certains interrogés la pratique semble ne pas présenter de limites (*agriculteur de l'ASA LN, CF*), pour d'autres elle en présente, en particulier concernant les aspects quantitatifs. Il est important que la REUT s'accompagne aussi d'une stratégie de réduction des consommations en eau (*ARS n°1, CF*, *DDT n°2, CF*). Les enjeux sanitaires ont également été mentionnés par quatre participants (*AE LB, CF*, *Chambre d'A. n°1, CF*, *Univ. de CF, CF*, *FRANE, CF*). L'acceptation de la pratique peut également être une limite (*ARS n°1, CF*, *Univ. de CF, CF*). Enfin, d'autres limites ont également été indiquées comme les coûts économiques associés notamment aux procédés et la difficulté d'avoir des estimations associées (*CAM, CF*). Enfin, la réglementation a également été indiquée par un des participants institutionnels comme un frein à la pratique (*DDT n°2, CF*).

Au final, ces éléments apportent un aperçu du positionnement des différents acteurs sur la REUT ainsi que les préoccupations individuelles et les enjeux perçus. Les réponses des acteurs de Clermont-Ferrand ne nous ont pas indiqué la présence d'attitudes de forte opposition vis-à-vis de la pratique. C'était également le cas dans les ateliers de la Drôme et de Porquerolles. Ce constat semble indiquer, à première vue, un contexte plutôt propice à la discussion collective.

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

- **Perception des autres parties prenantes**

L'analyse qualitative des entretiens *ex ante* menés avec les participants de Clermont-Ferrand a permis d'identifier la manière dont étaient perçues certains acteurs par d'autres. Cette identification a également été permise grâce à la question semi-directive « *quelles personnes seraient à impliquer dans la gestion des risques ?* ». Cette question nous a également permis d'identifier la perception de son propre rôle par certains acteurs. Les participants ont également été interrogés sur la confiance envers une filière de traitement supplémentaire gérée i) par la collectivité, ii) par un privé ou iii) par les agriculteurs.

Plusieurs acteurs opérationnels jouent un rôle important dans la gestion des risques. Pour la personne de CAM, les gestionnaires de la station d'épuration jouent un rôle clé dans la gestion des risques par rapport à la qualité de l'eau rejetée dans les lagunes de maturation. Cette indication est intéressante car elle rejoint la justification de la contribution de la collectivité dans la prise en charge de l'unité de traitement supplémentaire au nom d'une amélioration du rejet. Ils ont également un rôle d'alerte en cas d'un éventuel dysfonctionnement de la filière de traitement (*CAM, CF*). Ainsi, un dysfonctionnement à leur échelle impacte l'ensemble de la filière :

> [Entretien *ex ante*] « *La CAM si eux ça ne fonctionne pas à leur niveau le reste fonctionnera pas » (DDT n°2, CF)*

Le rôle de l'agriculteur à l'échelle individuelle est perçu différemment selon les acteurs. L'agriculteur membre de l'ASA LN ne s'identifie pas nécessairement comme un acteur de la gestion des risques puisque pour lui, cette gestion des risques doit être faite en amont de la borne d'irrigation pour assurer une eau d'une qualité suffisante (*agriculteur de l'ASA LN, CF*). Pourtant, pour certains interrogés, l'agriculteur est impliqué dans la gestion des risques en particulier pour la mise en œuvre des contraintes d'usage qui sont imposées dans l'arrêté du 02/08/2010 (alors en vigueur) : respect des restrictions d'usage imposées par la qualité atteinte, respect des délais de retour au champ ou encore respect des périodes d'irrigation (C4_INS). Dans la configuration actuelle, la gestion des risques est assurée par l'ASA LN qui est responsable de la qualité de l'eau issue des lagunes et utilisée au point de conformité. Elle joue également un rôle d'unité structurante et de transmission de l'information auprès des membres. Le membre de l'ASA LN interrogé indique une confiance envers les membres du bureau pour assurer une gestion suffisante des risques. Les nombreuses années de fonctionnement prouvent que les choses « *sont faites comme elles doivent être faites* ». Cette expérience de plusieurs années a été un argument pour indiquer une réponse négative à l'affirmation indiquant que la REUT est une pratique pouvant représenter des risques pour la santé humaine et animale :

> [Entretien *ex ante*] *« On a le cas de l'ASA LN qui montre quand même depuis trente ans il y quand même pas eu de souci, pas de problèmes de santé, ni rien. Donc, je pense qu'à mon avis, faire voilà, en cadrant un minimum et en appliquant la réglementation moi, je ne pense pas »* (*DDT n°2, CF)*

Il est néanmoins intéressant de voir que, lorsqu'interrogés sur leur degré de confiance envers une filière de traitement supplémentaire gérée par les agriculteurs, des participants ont indiqué une confiance moins élevée que si elle était gérée par une collectivité ou un privé. En effet, compte tenu du besoin vis-à-vis de l'eau pour irriguer, certaines exigences pourraient parfois être contournées notamment concernant la qualité de l'eau. L'intégration d'autres acteurs dans la gestion est donc importante et notamment les acteurs institutionnels liés au sanitaire :

> [Entretien *ex ante*] *« La difficulté c'est que plus l'utilisateur final a un niveau exigence important sur son utilisation, plus il va être regardant sur tout le process de traitement. Moins il a un besoin final important, moins il va l'être. Il va plus vivre comme des contraintes certaines réglementations quitte à passer à côté. Je ne dis pas que les agriculteurs font*

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

n'importe quoi mais c'est humain pour moi (…) Ils ont leurs intérêts qui priment. Pour eux, s'ils ont besoin d'arroser, ils vont moins être regardant sur la qualité de l'eau. C'est dur d'être juge et parti. C'est important que l'ARS soit dans la boucle. » (CAM, CF)

Pour d'autres interrogés, l'ASA a une responsabilité vis-à-vis de ces membres (*DDT n°2, CF*). Le bureau de l'ASA est également composé d'agriculteurs qui sont des utilisateurs et qui ont donc également intérêt à ce que les normes soient respectées :

[Entretien *ex ante*] *« Ils n'ont peut-être pas intérêt à jouer avec le feu parce que ce seront eux les utilisateurs. Il n'y a pas d'intérêt à scier la branche sur laquelle on est assis » (FRANE, CF)*

D'autres acteurs opérationnels sont également clés comme les chambres d'agriculture pour la sensibilisation ou le partage d'informations (*Chambre d'A. n°1, CF*) ainsi que les bureaux d'étude qui accompagnent la mise en œuvre des projets ou le suivi. Dans le cas de Clermont-Ferrand, le bureau d'étude joue un rôle important dans la rédaction du plan de gestion des risques.

La perception des acteurs institutionnels est variable. Pour le participant de CAM, la DDT est un acteur compétent pour la gestion des risques. L'ARS est un acteur clé pour le suivi mais il n'a pas l'habitude de travailler avec eux. Depuis le décret du 29 août 2023, l'avis favorable de l'ARS n'est plus obligatoire pour la validation des dossiers. Ainsi, pour le participant de l'ARS, elle pourrait ne plus jouer un rôle direct dans la gestion des risques et risque d'être sollicitée à la fin des procédures. Or l'ARS est importante pour faire valoir les intérêts sanitaires face aux intérêts économiques ou environnementaux (C4_INS). Son implication pourrait être intéressante pour conduire des études épidémiologiques, qui contribueraient à étoffer les connaissances actuelles (*ARS n°1, CF*). A notre connaissance, l'étude épidémiologique conduite à Clermont-Ferrand dans les années 90 (Devaux *et al.,* 2001) est la seule étude de ce genre concernant les risques associés à la REUT en France. Au-delà de la DDT ou de l'ARS, l'implication des acteurs associés aux enjeux quantitatifs, comme les agences de l'eau, semble moins pertinente pour la gestion des risques. Néanmoins, ils sont à associer compte tenu des liens intrinsèques entre la gestion qualitative et quantitative et qu'ils contribuent à la validation des projets notamment à travers le financement. Un des participants a indiqué percevoir l'Agence de l'eau comme opposé à la REUT :

[Entretien *ex ante] « Je sais que l'agence de l'eau, elle est très réticente à la REUT »*

Lors de l'analyse qualitative de l'entretien *ex ante* mené avec l'acteur de l'Agence de l'eau, aucune *verbatim* indiquant une opposition n'a néanmoins été identifiée. Cela indique qu'il serait intéressant de réaliser plusieurs ateliers rassemblant des personnes différentes des entités.

Concernant l'ensemble des acteurs institutionnels, le membre de l'ASA LN indique une attitude plutôt critique. Plusieurs raisons sont invoquées : des normes imposées et souvent difficiles à mettre en œuvre ou encore la lenteur associée à la multiplicité des acteurs et aux démarches administratives. Cette lenteur semble difficilement compatible avec les usages agricoles qui ont besoin généralement besoin de réactions rapides compte tenu de la nécessité d'irriguer pour assurer la production agricole :

[Entretien *ex ante*] *« Pour moi l'administration y'a plus aucun bon sens. C'est ce que je viens de vous dire, on s'en sort très bien tout seul. Quand y'a une décision à prendre, faut pas que ça parte par mail, que ça revienne une semaine après. Quand on a besoin de l'eau, on a besoin de l'eau quoi. La gestion à la française, je peux plus la supporter. Donc toutes ces instances pour moi… » (agriculteur de l'ASA LN, CF)*

La recherche est également un acteur clé. Elle contribue à apporter les dernières connaissances sur le sujet, aussi bien technologique que réglementaire. Ces informations peuvent contribuer à questionner le système actuellement en place mais aussi apporter des retours d'expérience (*DDT n°2, CF*). Les

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

réunions annuelles des comités de pilotage sont des moments propices à cet apport (*CAM, CF*). Une certaine confiance envers la recherche a été indiquée puisque ces acteurs « *savent de quoi ils parlent* » (*ASA LN, CF*) et les informations apportées sont fondées sur des connaissances scientifiques (*FRANE, CF*).

Les acteurs de la société civile, comme les associations environnementales ou de consommateurs, ne se sont pas encore réellement positionnés sur le sujet de la REUT notamment en France (*Univ. de CF, CF*). Leur intégration dans la gestion des risques soulève des interrogations. En effet, il semble difficile de pouvoir discuter avec ces acteurs, compte tenu de leur positionnement parfois « extrême » sur certains sujets (*agriculteur de l'ASA LN, CF*). Un positionnement modéré vis-à-vis de la REUT a néanmoins été exprimé chez le participant de la société civile :

> *« Le retraitement des eaux usées ce n'est peut-être pas l'idéal, mais le moins pire qu'on a pour le moment. Elles ne sont peut-être pas pures à 150% mais si elles répondent aux besoins, il faut y aller. C'est une opportunité de palier à une situation qu'on a provoqué. Il faut s'adapter en attendant de trouver mieux » (FRANE, CF)*

C'était également le cas lors de l'atelier de la Drôme. Bien que le positionnement de ces participants est un positionnement individuel et qu'il ne reflète pas nécessairement celui de l'organisme qu'il représente, ces résultats font finalement écho à ceux indiqués par Noury (2021). Les connaissances des acteurs de la société civile ne semblent pas toujours être fondées sur des éléments scientifiques. Or, pour la personne de la CAM, il est important que les personnes impliquées dans les groupes de suivi aient des compétences et des connaissances suffisantes :

> [Entretien *ex ante*] *« Je suis très méfiant sur tout ce qui est société de consommateurs parce que les gens sont plus ou moins informés. Ils utilisent des raccourcis de la télé et d'internet sans vraiment connaitre le sujet (…) A mettre en place par l'ASA* [en parlant du comité de suivi] *pour que les gens qui arrivent dans ce groupe de suivi soient bien formés à un certain niveau pour avoir les compétences et les connaissances. Ou alors un interlocuteur qui a déjà les connaissances. Si c'est quelqu'un qui est du monde du traitement de l'eau, de la production agricole, il a déjà une sensibilisation en lui-même. Après si c'est le monsieur qui est facteur, il n'y connait rien. C'est ce qui peut être intéressant mais c'est ce qui peut être un frein » (CAM, CF)*

L'implication des acteurs de la société civile dans la gestion des risques ne semble pas nécessairement pertinente, mais ils doivent être tenus informés (*Chambre d'A. n°1, CF*). En effet, ils jouent un rôle de médiateur avec les populations (*AE LB, CF*). Actuellement, ils interviennent notamment « *lorsque le dossier est déjà finalisé* » au niveau du CODERST (*Chambre d'A. n°1, CF*). D'autres acteurs sont également à informer comme les maires des communes situées à proximité des périmètres irrigués. En effet, les maires ont un rôle dans l'application de l'arrêté (*ARS n°1, CF*) mais aussi de communication auprès des populations. Ils jouent également un rôle de médiateur et ont donc besoin de comprendre le fonctionnement des projets de REUT pour répondre aux éventuelles questions des populations (*DDT n°2, CF*).

En conclusion, pour l'acteur de l'Université de Clermont-Ferrand, l'engagement « maximal » de l'ensemble des parties prenantes est nécessaire. Néanmoins, il est nécessaire de bien distinguer les étapes où sont impliqués les acteurs notamment pour l'analyse de risques. Puisqu'il est difficile « d'être juge et parti », il est nécessaire de distinguer les personnes réalisant l'évaluation des risques de celles définissant la gestion et assurant sa mise en œuvre.

Pour résumé, les trois ateliers ont rassemblé des participants qui semblent majoritairement plutôt en faveur de la REUT. Dans le cas de Clermont-Ferrand, certains acteurs sont habitués à collaborer ensemble compte tenu de leur implication dans le comité de suivi (DDT, ASA LN, Université de Clermont-Ferrand…). Pour d'autres acteurs, si l'entité qu'ils représentent était déjà dans le comité de

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

suivi, c'était néanmoins la première fois pour ces personnes qu'ils collaboraient avec la plupart des autres participants (ARS, FRANE, agriculteur...). Dans le cas la Drôme, la plupart des acteurs s'était rencontré à travers les réunions du comité de pilotage. Enfin, dans le cas de Porquerolles, à part les porteurs de projet, les acteurs opérationnels du PNPC et de l'ASDFV n'avaient pas nécessaire collaborer avec la métropole ou la DDT.

- **Un espace propice à la discussion et à la collaboration**

Les avis des participants sur l'atelier de manière générale sont majoritairement positif pour l'ensemble des ateliers (Figure 56).

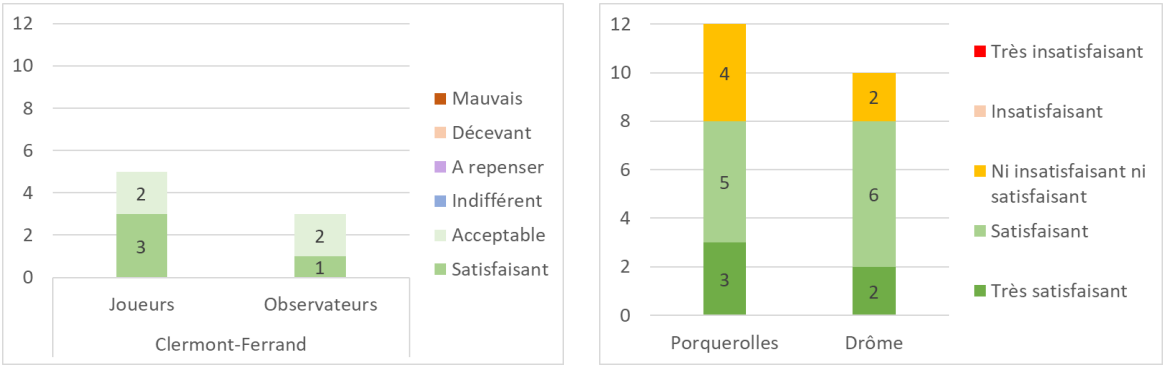


Figure 56 : Avis des participants concernant l'atelier de manière générale

L'analyse qualitative des justifications apportées à ces réponses a permis d'identifier différentes contributions du dispositif concernant la collaboration entre les parties prenantes.

Tout d'abord, des participants ont indiqué que l'atelier permet « *à de nombreux acteurs de se rencontrer, discuter et partager les expériences* » (*rôle « agriculteur – carotte », participant de la C3PS, DR*). Par exemple, la personne de l'ARS de l'atelier de Clermont-Ferrand a indiqué que l'atelier lui avait permis de rencontrer la personne de la CAM mais aussi de prendre le temps d'échanger avec la personne de l'Université de Clermont-Ferrand :

> [Entretien *ex post*] *« J'ai trouvé des personnes intéressantes comme le gestionnaire de la station d'épuration. Je n'avais pas eu l'occasion d'échanger avec ces gens donc ça super intéressant. La personne de l'Université que je connaissais mais on n'a jamais vraiment le temps de discuter et je pense qu'il y avait matière à apprendre pas mal de de choses aussi. »*
> *(rôle « agriculteur – pomme de terre », participant de l'ARS n°1, CF)*

La diversité des profils est un élément intéressant pour l'apport de différentes informations et de point de vue. La configuration en binôme qui a été mise en place pour les ateliers de la Drôme et de Porquerolles est indiquée comme un élément contribuant à cet échange :

> *[Débriefing] « J'ai l'impression que les binômes avaient été fait un sachant « scientifique » et un sachant « terrain », du moins on s'est vu comme ça, c'était l'avantage car on a pu expliquer les notions de traitement etc. et les autres ont pu expliquer la réalité du terrain »*
> *(rôle « agriculteur – pomme de terre », participant de MTPM n°2, PQ)*

Les questions peuvent être posées, notamment aux spécialistes, contribuant ainsi à l'amélioration des connaissances (P12_INS). La complémentarité des connaissances des participants a été reconnue à plusieurs reprises comme un facteur clé pour avancer dans la construction des scénarios. Selon la personne de l'ARS de l'atelier de Clermont-Ferrand, cette diversité de profil aurait néanmoins pu être un facteur bloquant compte tenu des intérêts et des attentes parfois différentes. L'atelier s'est toutefois déroulé dans une ambiance agréable et propice aux échanges :

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

[Entretien *ex post*] *« Bonne ambiance générale. Des intervenants d'origines différentes qui aurait pu faire qu'il y ait certaines tensions je pense notamment sur le sujet. J'ai trouvé que ça s'est très bien passé de ce côté-là, l'animation était très agréable aussi. Ce sont des éléments qui font qu'on a passé plutôt un moment agréable. Cela peut vous faire sourire mais on en a des réunions notamment dans le domaine agricole où, parfois c'est un peu plus tendu …Là j'ai trouvé que l'ambiance générale de travail était plutôt bonne » (rôle « agriculteur – pomme de terre », participant de l'ARS n°1, CF)*

« Honnêtement, moi je n'ai pas vu le temps passer alors qu'un truc comme ça on pourrait s'attendre à s'ennuyer et passer à autre chose, là c'était bien animé, très vivant, très réactif, c'était bien » (rôle « collectivité », participant de la CAM, CF)

Le format du dispositif propose une autre approche pour collaborer et contribue à mettre les différentes parties prenantes autour de la table. Il contribue à faire émerger la complexité du sujet :

[Entretien *ex post*] *« J'ai trouvé que c'était une méthode qui permettait de mettre autour de la table différents acteurs, même si on était sur une simulation, avec différents points et d'engager le dialogue sur un sujet qui s'avère autant complexe avec différents paramètres à voir, des intérêts qui peuvent être parfois divergent chacun vient avec sa petite idée et sa façon de voir les choses et on s'aperçoit qu'en discutant là c'était un peu plus compliqué que ça. Ça a au moins le mérite de mettre autour d'une même table l'ensemble des acteurs qui peuvent être concernés » (rôle « agriculteur - tomate » participant de l'AE LB, CF)*

[Entretien *ex post*] « *C'est vrai que c'est vraiment intéressant comme démarche et comme approche. C'est un peu innovant, parce qu'on n'a pas trop l'habitude de fonctionner comme ça. Mais sur les dossiers comme ça je trouve que c'est bien.*
Animatrice « et qu'est-ce que ça apporte de plus ? »
« Ça permet de mettre tout le monde autour de la table et donc du coup est assez très en amont, j'avoue que c'est quand même bien » (rôle « observateur », participant de la DDT n°2, CF)

Au-delà d'accompagner la collaboration entre les parties prenantes, le dispositif contribue également à se mettre à la place des autres notamment grâce au jeu de rôles. Incarner le rôle d'agriculteur a eu différents effets sur les participants dont la compréhension des contraintes et préoccupations des autres (*rôle « agriculteur – pomme de terre », participant de SUEZ, DR*, *rôle « agriculteur - tomate » participant de l'AE LB, CF*). La « simplification » des rôles agricoles a parfois rendu difficile l'engagement dans le rôle des participants provenant du monde agricole. Néanmoins, il a été reconnu que ce format contribue à confronter les points de vue :

[Débriefing] *« C'est vraiment intéressant de se mettre dans la peau d'un agriculteur, ça permet de lever tout un tas de questions. Chacun a joué son rôle et les apports des uns et des autres c'est toujours constructif » (rôle « agriculteur – maïs semence », participant du SMRD, DR)*

[Débriefing] *« je trouve ça un brin infantilisant au départ. C'est compliqué de se mettre dedans. Je suis très étonné d'un truc comme ça, je pensais que chaque métier allait apporter ces réponses là et qu'on ne me questionnerait pas pour arriver à ces choses-là. Faut arriver à se développer. Un peu compliqué à se projeter mais c'est intéressant de changer de place et d'entendre les remarques de tout le monde, c'est super intéressant de percuter les points de vue, même si c'est détendu et c'est vachement. Ça amène que du bon » (rôle « collectivité », participant agriculteur/SIID, DR)*

[Questionnaire *ex ante*] *« Chacun peut comprendre les contraintes des autres » (rôle « agriculteur – pomme de terre », participant de SUEZ, DR)*

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

L'incarnation de ce rôle par les autres parties prenantes a permis de mettre en lumière le besoin de transmission d'informations de la part des acteurs du domaine agricole en particulier concernant les pratiques agricoles.

Pour la personne de la CAM de l'atelier de Clermont-Ferrand, le format contribue à encourager le débat sans qu'une personne impose son idée aux autres. Ce constat n'est néanmoins pas partagé par la personne de la Chambre d'agriculture qui observait la session. Pour lui, le membre de l'ASA LN n'a pas pu pleinement s'exprimer par rapport à la personne de la CAM ou celle de l'Université. Le membre de l'ASA LN a reconnu s'être volontairement mis en retrait à plusieurs reprises des discussions.

« Après je me suis vachement fermé aussi, c'est des personnes qui n'y connaissent rien mais au final il faut accepter ce qu'elles imposent sans connaitre parce qu'elles ont du pouvoir » (rôle « président ASA », participant agriculteur de l'ASA LN, CF)

Ce positionnement n'a pas été retrouvé dans les ateliers de la Drôme et de Porquerolles. Le rôle occupé par ce joueur, celui de l'ASA, peut être un des facteurs expliquant ce résultat. En effet, pour les deux autres ateliers, ce rôle était une caractéristique d'un des rôles « agriculteurs ». Pour l'atelier de Clermont-Ferrand, ce rôle était un rôle à part entière dont le pouvoir d'action était assez faible par rapport aux autres rôles. Il est possible que ce rôle ait pu contribuer à un sentiment de mise à l'écart de ce participant. La personne de la Mairie de Saint-Beauzire a également été indiqué comme plus en retrait dans les discussions que les autres participants. Pour la personne de la CAM, cette mise en retrait était finalement révélatrice de l'implication des acteurs de la société civile dans la prise de décision concernant la gestion des risques. Néanmoins, cette attitude n'a pas été retrouvée dans les autres ateliers. Ce participant incarnait le rôle des habitants, un rôle qui a été supprimé à l'issue de l'atelier et dont le pouvoir d'action était également plus faible que les autres.

Au final, pour les trois ateliers confondus, 90% des participants ont indiqué que ce genre d'atelier contribue à l'organisation collective et 76% ont indiqué une contribution à l'implication individuelle (Figure 57).

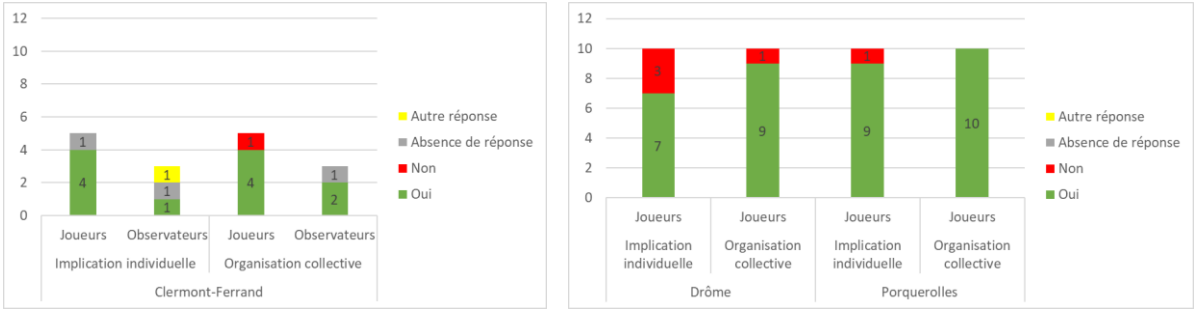


Figure 57 : Avis des participants sur la contribution de ce genre d'atelier à l'organisation collective et l'implication individuelle

Les participants ont justifié leurs positionnements en indiquant les différents facteurs déjà mentionnés précédemment : la compréhension des contraintes des uns et des autres et du système, la possibilité d'exprimer ses questionnements, le format rassemblant les différentes entités. La démarche contribue également à l'implication individuelle en grâce à l'apport d'une vision systémique et collective du système mais aussi à l'échelle de chaque maillon. Cet ensemble amène une réflexion individuelle sur sa contribution au fonctionnement global.

[Entretien *ex post*] *« Je pense que ça permet à chacun de prendre en considération les contraintes, les préoccupations des uns et des autres, on voit que ça doit être un effort partagé pour fiabiliser la filière, tout le monde a quelque chose à faire » (rôle « agriculteur - tomate » participant de l'AE LB, CF)*

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

[Questionnaire *ex post*] *« Il permet de montrer les intérêts des différents acteurs et donc les objectifs particuliers à coordonner pour parvenir à un projet collectif » (rôle « agriculteur – carotte », participant de la C3PS, DR)*

[Entretien *ex post*] *« Oui car si y'a une prise de conscience d'un risque, tout individu normalement constitué va essayer de s'engager pour minimiser le risque surtout si producteur de bien, il prend un risque vis-à-vis de lui-même, de la poursuite de son activité » (rôle « agriculteur - carotte », participant de l'Univ. de CF, CF)*

[Questionnaire *ex post*] *« Les échanges montrent les réalités de chaque structure, chaque personne se questionne sur ce qu'elle peut mettre en place » (rôle « collectivité », participant agriculteur/SIID, DR)*

Nous allons voir dans la prochaine section que la portée opérationnelle des résultats est questionnable.

3.4.2.2 Une absence de décision qui questionne l'intérêt d'un cas fictif

Bien que différents intérêts aient été indiqué concernant le dispositif et notamment le format « jeu de rôles », plusieurs participants se sont interrogés sur la pertinence de travailler sur un cas fictif et non directement sur le cas réel. Comme indiqué par certains joueurs, le format proposé par le dispositif n'est pas habituel. Certains participants ont indiqué avoir déjà participé à des ateliers de ce type, tandis que pour d'autres, il s'agissait d'une première expérience. Les attitudes de certains joueurs durant la simulation indiquent une certaine difficulté dans l'engagement, c'est-à-dire *« le choix individuel du joueur de s'investir dans une expérience ludique* » (Becu, 2020) et la mise en côté de la réalité.

Dans le cas de Clermont-Ferrand, par exemple, le cas de l'ASA LN a été mentionné à plusieurs reprises lors de l'atelier indiquant une difficile à la mise de côté de la réalité. L'intérêt de travailler sur un cas fictif a été souligné lors des entretiens *ex post*. Ainsi, la personne de la CAM a indiqué que le cas fictif « *oblige les gens à sortir de leurs idées préconçues et leurs besoins* ». Néanmoins, comme indiqué par la personne de l'ARS, plusieurs éléments ont limité le « *détachement* » vis-à-vis du cas réel. C'est le cas notamment de la présence des lagunes de maturation dans la filière de traitement du cas fictif et l'incarnation du rôle de la collectivité par la personne de la CAM. Deux joueurs et deux observateurs ont indiqué que l'intérêt de travailler sur un cas fictif était « *à repenser* ». Ainsi, pour la personne de la DDT qui observait la session, il semblerait peut-être préférable de travailler directement sur un cas réel compte tenu des attentes des participants au sujet de leur cas réel. La personne de l'Université rejoint également cet avis, le détachement vis-à-vis du cas réel paraissant difficilement possible :

[Entretien *ex post*] *« Quelles que soient les personnes autour de la table, elles vont toujours raisonner par rapport à ce qu'elles connaissent, à un projet réel. On est dans une finalité d'un projet réel. A partir du moment où les personnes vont être dans le projet final, ces personnes n'arriveront pas à avoir suffisamment de distance. J'avais beau me répéter que j'étais agricultrice, j'avais des réflexes qui revenaient automatiquement. » (rôle « agriculteur - carotte », participant de l'Univ. de CF, CF)*

Lors des ateliers de la Drôme et de Porquerolles, plusieurs joueurs se sont également interrogés au cours de la simulation, s'il s'agissait d'un cas fictif ou du cas réel. Ces retours nous indiquent que les objectifs associés à la simulation exploratoire à partir du cas fictif n'ont pas été assez bien explicités de notre part pour les trois ateliers.

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

Les discussions suscitées par la construction des différents scénarios n'ont pas permis d'aboutir à la production de scénarios décidés par l'ensemble des joueurs et d'aborder certains éléments clés comme le partage des responsabilités. Ainsi, la « frustration » associée à cette sensation de discussions inachevées peut expliquer les interrogations associées à l'intérêt du cas fictif et donc une préférence pour aborder directement le cas réel :

> [Entretien *ex post*] *« Pour la durée globale, ne pas dépasser les 2h mais certains points auraient mérité plus d'échanges entre les participants et ont été tronqués. C'est le temps associé à chaque question qui était posée qui était trop court. Je pense que certains sont repartis de l'atelier en étant frustré. » (rôle « agriculteur - carotte », participant de l'Univ. de CF, CF)*

> [Débriefing] *« C'est une très bonne mise en œuvre niveau pratique. On apprend des choses en même temps sur un cas. Après j'aurais bien aimé que le cas traité soit directement celui qui nous intéresse tous. » (rôle « agriculteur – pomme de terre», participant de MTPM n°2, PQ)*

Ces résultats sont également retrouvés dans des travaux sur les processus participatifs de la gestion de l'eau avec des participants indiquant le réalisme du jeu tandis que d'autres regrettant son manque de réalisme (Loudin, 2019 cité par Monfort, 2023). Dans notre cas, l'objectif associé à cette première simulation exploratoire n'était pas nécessaire le scénario final en lui-même mais plutôt le processus de construction et les discussions suscitées (Becu, 2020). Dans le cas de Clermont-Ferrand, il est fort probable que l'absence d'un réel débriefing permettant de faire le lien entre la simulation exploratoire et le cas réel ainsi que l'absence d'un deuxième atelier pour travailler le cas réel expliquent les interrogations des participants concernant l'intérêt de la simulation exploratoire. En effet, contrairement à l'atelier de Porquerolles, l'après-midi suivant la simulation exploratoire a été consacré à une réunion avec les porteurs de projet pour débriefer de l'atelier et identifier les productions issues de l'atelier à intégrer dans le plan de gestion.

La densité des informations apportées par l'outil et à mobiliser pour construire les scénarios a amené de nombreux participants de ces deux ateliers à trouver l'outil trop complexe. Cela peut expliquer certains résultats concernant l'évolution des connaissances sur les risques et les mesures ainsi que certaines conclusions sur les différentes approches de gestion et en particulier sur l'approche multi-barrières. Néanmoins, la complexité de l'outil, ou du moins sa densité reflète finalement bien la complexité de la gestion des risques liés aux micro-organismes pathogènes pour les projets de REUT et l'application du cadre réglementaire indiquant des perspectives intéressantes pour la méthodologie :

> [Débriefing] *« Dans les différents jeux de rôles que j'ai pu tester, il est particulièrement complexe (…) mais on touche du doigt la complexité de la chose. Je rejoins ce que dit XX, c'est la réalité. Ça permet à travers le jeu de toucher toute la complexité de la chose » (rôle « agriculteur – maïs semence », participant du SMRD, DR)*

> [Débriefing] *« Est-ce qu'on joue collectif, est ce qu'on joue individuel ? c'est des choses qui vont se poser à un moment donné. Le rôle de la collectivité, est ce qu'on met des billes. C'est assez concret, je trouve ça pas mal et ça pointe du doigt toutes les contraintes qu'il y a derrière. Parce que c'est vrai que vous entendez le préfet, y'a les Assises de l'eau, « y'a qu'à … faut qu'on… » les solutions miracles, on se rend compte que quand on met les mains dans le camboui …» (rôle « collectivité », participant de la Chambre d'A. n°2, DR)*

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

3.4.3 La production de données mobilisables pour les cas réels

3.4.3.1 Portée pour le cas de Clermont-Ferrand

Les porteurs de projet, c'est-à-dire les membres du bureau de l'ASA LN et la SOMIVAL Ingénierie, n'ont pas participé en tant que joueur à la session de simulation. Ce choix a été défini avec les porteurs de projet pour plusieurs raisons. Tout d'abord, les porteurs de projet avaient participé à la construction de l'outil de simulation ce qui risquait de biaiser les actions réalisées au cours de la simulation. De plus, l'objectif était qu'ils puissent observer les discussions et identifier les éléments qui pourraient être nécessaires à l'élaboration du plan de gestion des risques. Ils ont pu s'exprimer pendant le débriefing où ils ont apporté, dans une moindre mesure compte tenu du temps limité, les éléments qu'ils avaient observés pendant l'atelier mais aussi leur avis sur les discussions entre les joueurs et les productions issues de la simulation.

Les porteurs de projet ont pu rappeler aux participants les contraintes associées aux récents changements réglementaires ainsi que celles associées à la complexification des démarches associées, même pour un cas qui présente une expérience de plusieurs années :

> [Débriefing] *« Pourquoi tout ça ? parce que ça fait 25ans qu'on travaille et je considère qu'on ne travaille pas trop mal et j'ai bien l'intention qu'on continue tout aussi bien voire mieux. Après laver plus blanc que blanc … on va se plier une fois de plus, parce qu'on n'a pas le choix à la réglementation européenne. J'espère qu'un jour les jours évolueront sur la réglementation pour qu'elle soit praticable. Quand on la prend de but en blanc, pour moi c'est aberrant. A longueur de semaines, j'ai des journalistes qui me demandent ce qu'on pense de la réglementation et je dis : ''bon courage aux futurs dossiers !'' » (Président de l'ASA LN)*

Les propositions de mesures supplémentaires faites par les joueurs pendant la simulation exploratoire ont été rediscutées. Par exemple, la mise en place de panneaux de signalisation pourrait être envisageable mais à l'échelle de la commune. En effet, la mise en place des panneaux à l'échelle des parcelles serait trop complexe compte tenu de la taille du périmètre irrigué (1500 ha équipés)

> [Débriefing] *« Moi je suis pour de l'affichage, on en a parlé dans les ateliers* [nb : ceux réalisés en comité restreint]*. Mais un affichage à la commune. On est cinq communes, je prends la commune de Saint-Beauzire qui est la mienne et la plus concernée, les gens savent ce qu'on fait depuis pas mal d'années. Peut-être pas tous les gens, mais les gens connaissent le dossier. L'affichage ne me pose pas de souci. Par exemple, ''issue d'une irrigation avec des EUT''. On a déjà fait de la communication à la commune, je suis prêt à en refaire y'a pas de souci » (Président de l'ASA LN)*

Le message associé doit être réfléchi afin de ne pas stigmatiser les agriculteurs utilisant des EUT :

> *[Débriefing] « L'affichage c'est un vaste sujet, il faut faire attention à ne pas stigmatiser un périmètre par rapport à un autre secteur géographique » (membre de la Somival Ingénierie)*

Les risques associés aux riverains et aux passants ont également été rediscutés. Des indications sur les bonnes pratiques d'irrigation sont transmises aux adhérents pour limiter les risques de dispersion. Il est reconnu que des défaillances peuvent toujours survenir, ce qui fait écho à la variabilité des mesures mises en place par les agriculteurs. Néanmoins, il est important de pouvoir mettre ces défaillances en regard d'autres paramètres comme la fréquence d'exposition ainsi que la qualité des eaux utilisées.

Les étapes d'identification des risques (scénarios d'exposition) et d'identification des mesures existantes réalisées pendant la simulation ont apporté un ensemble d'éléments à intégrer au plan de

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

gestion des risques ainsi qu'une méthodologie pour le bureau d'étude en charge de la réalisation du dossier :

> [Débriefing] *« C'est le deuxième atelier où je participe avec l'outil. C'est impressionnant d'avoir appris encore des choses supplémentaires. Ça m'a permis de prendre mes notes sur un tableau de synthèse qui figure dans le dossier que je suis en train de monter pour la mise en conformité. C'est très utile » (membre de la Somival Ingénierie)*

> [Débriefing] *« Cela met en lumière ce qui se passe et ce qu'on pratique depuis très longtemps et les barrières. Je pense que les barrières c'était un peu confus et là on arrive à les clarifier » (membre de la Somival Ingénierie)*

Cet apport a également été souligné par un des participants de la DDT en charge de l'instruction des dossiers :

> [Entretien *ex post*] *« On se dit ça nous bouffe une matinée vu la charge de travail c'est pas neutre, si c'est pour perdre notre temps...parfois on sort de certaines réunions, on se dit qu'on aurait mieux fait de pas y aller quoi et là non. Franchement j'ai trouvé que c'était intéressant d'avoir participé et je trouve que ça va nous aider à nous après par rapport à l'instruction (…) j'ai des idées beaucoup plus claires sur ces questions-là. C'était une mise en pratique » (rôle « observateur », participant de la DDT n°2, CF)*

Un accompagnement n'a pas néanmoins pu être apporté concernant les risques chimiques ainsi que les risques environnementaux bien qu'un besoin de méthodologie et d'informations ait été exprimé par les porteurs de projet. Les retours confirment le besoin d'un accompagnement pour la construction de ce dossier et indiquent l'intérêt de la méthodologie proposée par le dispositif et des évolutions à envisager.

L'après-midi ayant suivi l'atelier a été consacré à la reprise des données produites pendant l'atelier avec les porteurs de projet et la construction du plan de gestion des risques. Plusieurs réunions ont également été réalisés jusqu'au dépôt de la demande d'autorisation au début de l'année 2023. Compte tenu de certains interrogations associées aux paramètres du modèle et de l'identification d'un besoin de mieux caractériser certains éléments, les résultats du modèle QMRA n'ont pas été utilisés pour la construction du plan de gestion des risques. Néanmoins, les différentes étapes qui la composent (formulation du problème, identification des paramètres d'exposition, identification des mesure *barrières* existantes…) ont été utilisées. Une méthodologie d'évaluation semi-quantitative des risques a été mobilisée pour évaluer les différents évènements dangereux identifiés selon leur fréquence et leur gravité : éventuelle défaillance des lagunes, des contaminations au niveau des réseaux ou encore une dispersion des aérosols. Pour les différentes cultures actuellement irriguées, les mesures *barrières* existantes ont été décrites : dépérissement au champ pour le maïs semence, séchage des oignons en chaufferie et naturel, lavage des carottes avant distribution… L'arrêté autorisant la réutilisation des EUT a été publié en juillet 2024. L'article 16 indique que « *l'irrigation des cultures vivrières consommées crues par les EUT est autorisée sous réserver de la mise en place d'une mesure barrière post-irrigation, telle que prévue dans l'annexe III. Il s'avère de la responsabilité de l'ASA Limagne Noire d'informer l'ensemble de ses adhérents des mesures barrières à mettre en place, le cas échéant ».*

Comme indiqué par la personne de l'Université de Clermont-Ferrand, la contribution du dispositif à l'organisation collective et l'implication individuelle dépendra également du transfert des productions aux acteurs concernés. Nous n'avons pas demandé à l'ASA LN comment le transfert des informations concernant les mesures *barrières* s'est opéré. La mise en œuvre opérationnelle n'a également pas été suivie, ce qui interroge sur la portée opérationnelle des résultats produits par la construction collective.

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

3.4.3.2 Portée pour le cas de Porquerolles

Pour les porteurs de projet de Porquerolles, l'atelier a apporté un certain nombre d'informations comme des connaissances sur les risques, le cadre réglementaire et les différentes approches. Cet atelier a également permis d'aborder les risques avec les acteurs opérationnels et les mesures *barrières* envisageables. Néanmoins, la partie consacrée aux mesures *barrières* a été trop restreinte par rapport aux attentes initiales. Pour ce cas d'étude, l'atelier s'est déroulé sur une journée entière. La matinée a été consacrée à la simulation exploratoire sur le cas fictif et l'après-midi au cas réel. La méthodologie utilisée pendant la session de simulation sur le cas fictif a été reprise, c'est-à-dire i) description du système, ii) identification des scénarios d'exposition ainsi que iii) évaluation des scénarios. Chaque maillon du système a ainsi été décrit : acteurs impliqués, populations exposées, voies d'exposition, fréquence, mesures barrières et contribution… L'atelier du matin ayant débordé, le temps a également été restreint pour l'atelier de l'après-midi. Cela n'a pas permis d'aller plus en profondeur sur l'évaluation des risques. Néanmoins, les porteurs de projet ont indiqué que cette journée a permis d'identifier différents éléments à intégrer au plan de gestion des risques, de pouvoir avoir une discussion avec les acteurs opérationnels sur les risques mais aussi avec les acteurs institutionnels et d'identifier une méthodologie pour construire le plan de gestion. Ce premier essai d'un atelier « cas réel » avec l'ensemble des participants a montré l'intérêt d'avoir réalisé un premier atelier sur le cas fictif pour familiariser les participants avec la méthodologie. Il a également permis d'aborder plus en profondeur des éléments abordés lors de la simulation sur le cas fictif, comme le port des EPI par exemple. Ce deuxième atelier a permis de mettre en lumière le besoin de mieux caractériser les données d'exposition pour les professionnels intervenant sur les lagunes. D'autres ateliers seront à réaliser notamment avec les acteurs institutionnels en lien avec le sanitaire comme l'ARS.

3.4.3.3 Portée pour le cas de la Drôme

Cet atelier a permis aux membres du comité de pilotage d'aborder le projet en construction à travers les enjeux qualitatifs qui, jusqu'à présent, avait plutôt été abordé à travers les enjeux quantitatifs. Un des participants a indiqué que le dispositif accompagne la construction des scénarios :

> [Débriefing] *« A travers ces différents tableaux on a une logique de réflexion et de construction d'un projet dans lequel on peut insérer de la donnée qu'on traite par rapport au projet de territoire. Ça va nous aider à construire des scénarios. Ça fait une mise en situation » (rôle « agriculteur – maïs semence », participant du SMRD, DR)*

Ainsi, le dispositif semble présenter un intérêt pour les projets en cours de construction. L'atelier ayant été réalisé à la fin de la thèse, il n'a toutefois pas été possible de réaliser d'autres ateliers.

3.4.4 En conclusion

Dans cette partie, nous avons montré que les participants indiquent différents apprentissages à l'issue de l'atelier. Tout d'abord, concernant les risques associés à la REUT, l'outil apporte de nouvelles notions comme la dose d'exposition ou les DALYs. Les autres participants contribuent également à cet apport en apportant des explications supplémentaires. La méthodologie et les résultats produits ne font toutefois pas consensus. Le degré de précision jusqu'où pousser l'identification collective suscite des interrogations chez les participants. La subjectivité des résultats est également interrogée puisqu'ils dépendront des participants présents. Ces résultats confirment la nécessité de réaliser la

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

construction des scénarios d'exposition de manière collective pour faire émerger cette subjectivité. Le DALYs est une nouvelle notion qui suscite de l'intérêt chez les participants. Comme indiqué dans la littérature, c'est une notion qui semble plus complexe. Concernant la gestion, l'outil et les autres participants apportent des informations clés sur les pratiques existantes et leur contribution à la réduction des risques. Les différentes parties prenantes présentes contribuent à apporter différents avis sur les mesures envisageables, leur contribution et leur mise en œuvre. Enfin, des informations ont également été apportées sur le cadre réglementaire, des informations demandées notamment par les acteurs institutionnels. Néanmoins, en l'absence d'un réel débriefing et d'ateliers supplémentaires, les questionnements des participants persistent et nous pouvons nous interroger sur les effets de la simulation en terme d'apprentissage.

Les contributions attendues du format du « jeu de rôles » ont été identifiées : se mettre à la place de l'autre, envisager de nouvelles possibilités, encourager la collaboration entre les différentes parties prenantes … Compte tenu des discussions inachevées, des questionnements persistent sur la simulation mais aussi sur la portée opérationnelle des résultats produits. Au final, les données produites ont été utilisées pour le dossier de mise en conformité du cas de Clermont-Ferrand. Néanmoins, un autre atelier avec l'ensemble des participants aurait été nécessaire pour travailler de manière plus approfondie les résultats. Dans le cas de la Drôme, l'atelier a permis d'explorer collectivement les enjeux associés aux risques sanitaires et aux usages envisageables. Un autre atelier serait nécessaire pour finaliser les choix. Dans le cas de Porquerolles, un deuxième atelier a été réalisé le même jour que l'atelier de simulation exploratoire. Cet atelier a permis de revenir sur les résultats produits et d'aborder le cas réel, confirmant ainsi l'intérêt de la méthodologie. Néanmoins, certains acteurs étaient absents. C'est le cas, par exemple, de l'ARS. Un autre atelier serait donc également nécessaire.

Si les scénarios n'ont pas été achevés et que notre méthodologie est discutable, les processus de construction de la gestion des risques mobilisant différentes parties prenantes ont toutefois permis de faire émerger un ensemble d'éléments qui nous ont permis d'identifier un certain nombre d'apports pour des filières de REUT durables.

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

4 Discussion générale et conclusion – Apports de la construction collective pour des filières de REUT durables

Durant ces trois années de thèse, j'ai questionné la gestion des risques microbiologiques pour la réutilisation des eaux usées traitées et plus particulièrement la construction collective de cette gestion pour des filières de REUT durables. Par « durables », j'entends des filières de REUT qui répondent aux objectifs de développement durable, c'est-à-dire qui soient « *à la fois écologiquement viable, économiquement efficace et socialement équitable* » (Harding, 1998 cité par Barnaud, 2008). La REUT pourrait sembler, par essence, répondre à ces objectifs. En effet, elle est annoncée dans de plus en plus de stratégies nationales pour répondre à l'accroissement et à la généralisation des tensions sur les ressources en eau dues aux activités humaines et au dérèglement climatique. En France par exemple, le Plan Eau paru en mars 2022 annonce un plan d'action pour une gestion résiliente et concertée de l'eau pour faire face à l'accroissement des tensions sur les ressources en eau. Des tensions qui ont particulièrement marqué ma thèse : sécheresses estivales et hivernales historiques, tensions sociales autour des « méga-bassines » dans les Deux-Sèvres … La massification du recours aux eaux non conventionnelles et notamment aux eaux usées traitées fait partie de ces mesures.

Les renforcements des exigences de qualité qui ont eu lieu suite à la parution du *Règlement (UE) 2020/741 du Parlement européen et du Conseil du 25 mai 2020 relatif aux exigences minimales applicables à la réutilisation de l'eau* pour l'irrigation agricole suscitent néanmoins des interrogations concernant l'atteinte de ces objectifs de massification à l'échelle de la France (Lombard-Latune & Bruyère, 2023) et plus largement de l'Union Européenne (McLennan *et al.,* 2024). En effet, ce renforcement va nécessiter la mise en place de procédés de traitement poussés en particulier pour atteindre les classes les plus exigeantes. Ces procédés représentent généralement des coûts économiques élevés pour les cas de REUT existants, qui peinent souvent à trouver un équilibre économique (Lombard-Latune & Bruyère, 2023 ; Locqueville *et al.,* 2023). L'atteinte des qualités les plus strictes pourrait alors être difficile, or ces qualités sont requises pour irriguer les cultures « sensibles » comme les cultures alimentaires. Au-delà des coûts économiques, les impacts environnementaux associés à ces procédés avancés sont de plus en questionnés, bien qu'ils soient encore souvent négligés (de Boer *et al.,* 2022). Cela m'amène donc à questionner la réponse de la REUT aux enjeux du développement durable.

Le RE 2020/741 introduit toutefois la possibilité de déroger à ces exigences grâce à la mise en place de mesures « barrières » au-delà du traitement : systèmes d'irrigation localisés, attente d'un temps de dépérissement naturel des microorganismes pathogènes, préparations post-récolte des produits finaux… Cette approche « *multi-barrières* » est encouragée par l'Organisation mondiale de la santé (OMS) dans ses directives de 2006. Cette approche *multi-barrières* est caractérisée par i) une évaluation des risques sanitaires qui repose sur la dose d'exposition plutôt qu'uniquement la concentration en microorganismes dans les eaux réutilisées et ii) une gestion des risques sur l'ensemble de la filière pour atteindre des objectifs liés à la santé des populations exposées. La gestion des risques n'est donc pas uniquement basée sur la mise en place de procédés de traitement avancé mais sur la mise en place de mesures *barrières* tout au long de la filière. C'est donc une approche systémique et intégrée des risques, qui nécessite l'implication d'un large panel d'acteurs dont les agriculteurs. Pour l'OMS, cette approche contribue à considérer d'autres facteurs dans la construction de la gestion des risques au-delà des enjeux sanitaires et notamment les impacts économiques, environnementaux et sociétaux. Ainsi, je me suis intéressée aux apports que pourraient avoir une construction collective des risques microbiologiques pour des filières de REUT durables.

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

J'ai proposé plusieurs hypothèses :

- La construction collective impliquant **les différentes parties prenantes** contribue à construire une **gestion systémique et intégrée des risques,** c'est-à-dire sur l'ensemble de la filière, et impliquant les différents acteurs concernés et également **adaptée** aux spécificités du terrain.
- L'approche ***multi-barrières*** contribue à cette gestion **systémique et intégrée** en encourageant l'évaluation des risques par la **dose d'exposition** et la mise en place de **mesures *barrières*** *;*
- Une approche systémique et intégrée des risques contribue à **l'affranchissement des contraintes associées aux procédés de traitement supplémentaire** et à la construction de filières de REUT durables.

Pour tenter de répondre à ces hypothèses, un outil de simulation participative sous la forme d'un jeu de rôles a été co-construit pour accompagner la construction collective. Il a été co-construit grâce à un processus de modélisation d'accompagnement avec une partie des acteurs de Clermont-Ferrand (2022-2023). Il permet aux différentes parties d'un cas de REUT existant ou un projet en construction de créer, tester et simuler collectivement différents scénarios de gestion des risques. Il intègre un modèle d'évaluation quantitative des risques (*Quantitative Microbial Risk Assessment)* qui permet de calculer des probabilités de risque associées à une dose d'exposition et les effets sur la santé associés. Il intègre également un modèle de gestion et notamment une base de données sur les mesures de gestion envisageables, leur contribution à la réduction des risques et les coûts économiques associés. Ces éléments ont été rassemblés à partir des cadres normatifs, de la littérature et du cas de Clermont-Ferrand. Cet outil a ensuite été utilisé avec le comité du suivi de Clermont-Ferrand pour aborder collectivement la mise en conformité et produire des données pour le plan de gestion des risques (2023). Il a également été utilisé sur le cas de Porquerolles (2024), qui est un autre cas de REUT existant ainsi que sur un projet en construction dans la Drôme (2024). Un protocole de suivi-évaluation intégrant des méthodes mixtes a été construit pour étudier différents éléments :

- Les productions issues des différents ateliers : identification des risques (scénarios d'exposition), évaluation des risques (QMRA), construction du scénario « approche conventionnelle », construction du scénario « multi-barrières » ;
- Les effets d'apprentissage associés à l'atelier sur quatre thématiques : les risques sanitaires associés à la REUT, les mesures de gestion, le cadre réglementaire et les autres parties prenantes ;
- L'apport du dispositif et principalement de l'outil de simulation participative compte tenu du faible nombre d'ateliers qui ont été menés pour chaque cas d'étude.

A travers les résultats obtenus à l'issue des trois ateliers, je montre tout d'abord que l'intégration des différentes parties prenantes (opérationnelles, institutionnelles, scientifiques ou encore de la société civile) dans un processus de construction collective de scénarios de gestion des risques sanitaires encourage une approche transdisciplinaire de la gestion des risques. Cette approche combine ainsi une approche interdisciplinaire qui intègre des connaissances de différentes disciplines académiques mais aussi l'inclusion d'un large panel d'acteurs dans la construction (Lawrence *et al.,* 2022).

En effet, je me suis d'abord intéressée aux différentes approches de gestion des risques microbiologiques. L'analyse des approches de gestion adoptées successivement par les directives de l'OMS a montré l'importance d'intégrer plusieurs disciplines scientifiques pour la gestion des risques microbiologiques (Chapitre 1, section 1.1). Les connaissances microbiologiques montrent que des microorganismes pathogènes, c'est-à-dire représentant un risque pour la santé humaine, peuvent être présents dans les eaux usées traitées. Des méthodes d'analyse permettent d'identifier ces risques et les quantifier en se basant notamment sur les indicateurs de contamination fécale. L'ingénierie sanitaire a permis le développement de procédés de traitement qui contribuent à réduire la

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

concentration en microorganismes dans les EUT. Les résultats des études épidémiologiques ont ensuite montré que les risques dépendaient de la qualité de l'eau utilisée mais également des usages agricoles : cultures irriguées, systèmes d'irrigation, destination des cultures … Ces éléments ont alors encouragé une approche de gestion des risques où différentes qualités sont définies selon l'usage. Néanmoins, à travers l'état de l'art, nous avons vu que la littérature interpelle sur les limites associées à une approche interdisciplinaire de la gestion des risques uniquement basée sur des savoirs académiques : non prise en considération de l'influence de la perception des risques et de la gestion par les différentes parties prenantes, non intégration des attentes, des besoins et des spécificités du terrain, exigences en terme de gestion pas toujours appliquée, acceptation limitée de la pratique … L'intégration de l'ensemble des parties prenantes est encouragée par les cadres normatifs (NRMMC *et al.,* 2006 ; WHO, 2006 ; Maffettone & Gawlik, 2022). Néanmoins, les approches participatives sont encore peu mobilisées.

L'intégration des différentes parties prenantes, et notamment des acteurs non-académiques, nous a permis de conclure sur différents résultats concernant les apports de la construction collective de la gestion des risques microbiologiques pour des filières de REUT durables. Ces différents résultats vont être résumés et discutés au regard de la littérature actuelle sur le sujet mais aussi des limites associées à notre méthodologie. Des perspectives identifiées pour tenter de lever ces limites seront présentées. Cette discussion générale est construire en différentes parties au regard de la définition d'une filière de REUT durable : 1) Assurant la sécurité sanitaire des populations exposées, 2) Economiquement soutenable, 3) Socialement acceptable. Enfin, je terminerai par les perspectives qu'offre l'outil de simulation participative et les évolutions qui sont nécessaires.

4.1 Des filières de REUT assurant la sécurité sanitaire des populations exposées

- **Une identification collective permettant de faire émerger la subjectivité des représentations et encourager la protection de l'ensemble des populations exposées**

Une « démarche d'évaluation des risques sanitaires » est demandée par l'arrêté du 18/12/2023. Le contenu est précisé dans l'arrêté du 28/07/2022 relatif au dossier de demande d'autorisation. L'article 1 stipule notamment qu'une « *identification des populations susceptibles d'être exposées aux eaux usées traitées, l'estimation du nombre de personnes concernées et des voies d'exposition* » doit être réalisée ainsi que la « *caractérisation des situations d'exposition* ». La construction collective des scénarios d'exposition a confirmé une perception parfois hétérogène des risques sanitaires entre les différentes parties prenantes de la REUT comme indiqué dans la littérature (Hartley, 2006 ; Baggett *et al.,* 2006 ; Keraita *et al.,* 2008 ; Antwi-Agyei *et al.,* 2016 ; Goodwin *et al.,* 2019). La construction collective contribue à une confrontation des représentations et à adopter une approche réflexive sur sa perception. Nous retrouvons les apports de la simulation participative sur l'apprentissage réflexif (Becu, 2020). Nous avons montré que l'intégration d'acteurs de domaines différents contribue à cette approche réflexive et à construire les scénarios d'exposition. Par exemple, les acteurs du sanitaire contribuent à apporter des définitions clés et à l'appréhension de notions complexes. Les acteurs du domaine agricole contribuent à apporter des informations sur les pratiques existantes et à identifier les risques d'exposition notamment pour le personnel d'irrigation. L'intégration des agriculteurs dans la construction des plans de gestion des risques est encouragée dans la littérature pour apporter identifier les éléments clés associés à l'évaluation des risques et assurer une gestion suffisante des risques. C'est le cas, par exemple, de la Banque Mondiale et de son approche « *Effective agricultural risk management »* qui encourage l'intégration des agriculteurs pour identifier, évaluer et atténuer les risques auxquels le secteur agricole peut être confronté. Cela concerne les risques sanitaires mais aussi d'autres risques associés aux fluctuations des prix ou encore au changement climatique. Pour les

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

risques sanitaires par exemple, ils contribuent à identifier les cultures les plus à risques mais également les risques les concernant (World Bank, 2016). Cinq participants aux ateliers étaient des agriculteurs utilisant actuellement des EUT (Clermont-Ferrand, Porquerolles) ou des potentiels utilisateurs (Drôme). Nos résultats confirment l'intérêt d'intégrer ces acteurs à la construction de la gestion.

- **Le besoin d'un réel débriefing et d'ateliers supplémentaires pour travailler la subjectivité des résultats produits**

Nous avons également montré que l'identification de l'exposition des professionnels n'est pas systématiquement perçue comme un problème par les acteurs concernés, ce qui rejoint les résultats de certaines études (Keraita *et al.,* 2008). Les retours *ex post* du participant de Clermont-Ferrand indique un apport de connaissances sur les risques associés aux EUT mais une attitude d'opposition vis-à-vis de la méthodologie et des résultats produits. Concernant les autres participants du domaine agricole, l'analyse *ex post* ne nous permet pas de conclure sur un effet du dispositif concernant la perception des risques de ces acteurs. Le protocole de suivi-évaluation des effets que nous avons mis en place serait à revoir pour mieux capturer ces évolutions. Dans l'ensemble des ateliers, les réactions vis-à-vis de la méthodologie et les résultats produits sont hétérogènes et des questionnements persistent. Une appréciation qualitative a été réalisée collectivement pour définir les scénarios à considérer. Les résultats produits varient selon les ateliers, ce qui a amené des questionnements concernant l'objectivité des résultats produits. Si ces réactions confirment l'intérêt de confronter les représentations pour faire émerger ces subjectivités, il serait néanmoins important de ne pas négliger le temps du débriefing pour pouvoir aborder les résultats produits et les questionnements. Il serait également important de pouvoir réaliser plusieurs ateliers avec différents participants, puis de confronter les résultats obtenus avec l'ensemble des participants. Nous reviendrons sur cet élément dans les perspectives associées au dispositif.

La construction collective contribue également à faire émerger de nouveaux scénarios d'exposition au-delà de ceux proposés dans le modèle d'évaluation. La littérature indique l'intérêt de la simulation participative pour faire émerger des informations (Becu *et al.,* 2020). Ces scénarios reflètent les représentations des joueurs et leurs questionnements. Néanmoins, le modèle d'évaluation n'a pas permis de pouvoir travailler ces scénarios. Leur mise de côté a généré des interrogations chez les participants. D'un point de vue scientifique, il serait important de pouvoir travailler ces scénarios et caractériser les paramètres d'exposition associés. D'un point de vue opérationnel, cela confirme la nécessité du débriefing et d'ateliers supplémentaires pour pouvoir retravailler ces scénarios émergents.

- **Un besoin de mieux caractériser les paramètres d'exposition et des interrogations concernant la gestion des risques lors de l'utilisation des classes de qualité inférieures**

Bien que des interrogations persistent sur les résultats obtenus, ils interrogent toutefois la non-considération des professionnels dans l'évaluation des risques associés à l'inhalation réalisée par l'Anses (2012) ainsi que le faible nombre d'études scientifiques identifiées dans l'état de l'art concernant l'exposition des professionnels lors dans le cadre de la REUT. En effet, la plupart des études analysant les risques associés à la REUT portent sur les consommateurs. Or la construction collective des scénarios d'exposition et l'évaluation des risques grâce au modèle QMRA ont montré que les risques persistent pour les professionnels et que les consommateurs semblent plutôt protégés grâce aux pratiques existantes et aux équipements utilisés. Cette exposition semblerait d'autant plus importante que les professionnels pourraient être exposés par plusieurs voies d'exposition : l'eau, l'air, le sol ou encore la plante mais aussi le produit puisque les agriculteurs ont indiqué être consommateur de leur produit lors de la co-construction avec les acteurs de Clermont-Ferrand. Dans notre modèle,

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

les professionnels sont distingués en trois catégories : le personnel d'irrigation, d'entretien et de récolte. Ce choix a suscité différentes réactions chez les participants car s'il permet de pouvoir distinguer le personnel agricole permanent du personnel saisonnier dans le cas du maïs semence, il ne faudrait pas négliger la multi-exposition de ces acteurs. En se basant sur les travaux de Haas *et al.* (1999), Seidu *et al*. (2008) ont calculé la probabilité « combinée » d'infection annuelle pour des agriculteurs en considérant les probabilités d'infection associées à l'ingestion par l'eau d'irrigation et à l'ingestion par le sol. Cette formule est également mentionnée par l'OMS dans ses directives sur la QMRA (2016). Peu d'études similaires reprenant cette formule ont néanmoins été retrouvées dans lors de l'état de l'art. Il serait intéressant de pouvoir l'intégrer dans notre modèle QMRA et réaliser des calculs pour évaluer plus finement les risques pour les professionnels. Un besoin de mieux caractériser l'exposition des professionnels serait toutefois nécessaire. En effet, les volumes d'exposition utilisés dans les études et notre modèle (1mL/évènement) semblent faibles par rapport aux indications des participants aux ateliers. Des recherches doivent être menées sur le sujet. Il pourrait être intéressant de mener, par exemple, des études épidémiologiques comme l'encourage l'OMS (WHO, 2006). La seule étude que nous avons retrouvé à l'échelle de la France est celle qui avait été menée dans les années 1990 à Clermont-Ferrand (Devaux *et al.,* 2001).

L'identification des professionnels a également permis de questionner l'approche conventionnelle et les exigences de qualité. En effet, des eaux de qualité moins poussées sont requises pour les cultures des classes C et D qui sont des cultures non-alimentaires (fourrages, cultures industrielles, énergétiques ou encore semencières). Les professionnels peuvent alors être exposés à des concentrations ≤ 1 000 *E.coli* UFC/100mL (classe C) voire ≤ 10 000 *E.coli* UFC/100mL (classe D). Des estimations des effets sur la santé doivent être réalisées pour ces classes de qualité. Il serait toutefois également important de pouvoir considérer l'immunité acquise par ces acteurs dans les calculs de risque comme recommandé par Seis *et al.* (2022) ou l'OMS (WHO, 2016). Ces interrogations sont également valables pour les riverains et les passants lors de l'utilisation de ces classes de qualité. En effet, ces cultures sont généralement irriguées avec des systèmes par aspersion qui produisent des aérosols qui peuvent se disperser. Les paramètres d'exposition pour ces populations doivent également être mieux caractérisés. Des études ont été publiées sur la dispersion des aérosols et les risques associés dans le cadre de la REUT (Zardari *et al.,* 2022 ; Massiot *et al.,* 2023). Ces études sont des opportunités intéressantes pour mieux caractériser les risques associés aux aérosols et à leur dispersion. Il semble important de pouvoir mobiliser les résultats et les formules développées dans le cadre scientifique pour accompagner les évaluations des risques réalisées par les acteurs du terrain. Les études peuvent néanmoins amener des recommandations assez strictes, c'est le cas notamment de mettre en place des distances correspond à deux fois la portée de l'aspersion (Molle *et al.,* 2009). Néanmoins, l'évolution des recherches et le développement de nouveaux modèles comme ceux développés par Zardari *et al.* (2022) semblent une opportunité intéressante pour développer des modèles plus précis. L'intégration des acteurs opérationnels à la discussion des résultats produits est alors essentielle pour discuter les choix de gestion associés.

- **Des limites supplémentaires identifiées concernant les classes de qualité requises**

Comme indiqué dans la littérature (McLennan *et al.,* 2024) et souligné par certains participants lors de la construction collective des scénarios, des re-contaminations post-traitement peuvent avoir lieu au niveau du stockage et/ou au niveau des réseaux de distribution. Néanmoins, le « point de conformité » est actuellement défini dans l'arrêté du 18/12/2023 comme : « *le point de sortie des eaux usées traitées de l'installation de production de ces eaux* ». L'arrêté indique également que des « *points de conformité complémentaires situés au plus proche du lieu d'utilisation* » peuvent être demandés mais ne sont pas obligatoires. Ainsi, cela interroge sur la prise en compte de ces éventuelles fluctuations de qualité dans l'approche actuelle de gestion. La mise en place d'une chloration a été envisagée par

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

certains joueurs pour gérer ces re-contaminations. Cette mesure est envisagée par la norme ISO 16075-2 (2020) : la désinfection additionnelle dans le champ des EUT par une légère désinfection (concentration résiduelle en chlore total inférieure à 1 mg/l après 30min de chloration) contribue à une réduction de 2 log et une désinfection poussée (concentration résiduelle en chlore total supérieure à 1 mg/l après 30min de chloration) contribue à une réduction de 4 log. L'utilisation de la chloration fait néanmoins débat. En effet, ce procédé génère des sous-produits toxiques pour la santé (de Boer *et al.,* 2022). Les Pays-Bas ont d'ailleurs interdit son utilisation (Criquet, 2020). Selon de Boer *et al.* (2022), les impacts sanitaires associés aux procédés de traitement avancés seraient une dimension à considérer pour les choix de gestion. Ces éléments doivent être caractérisés et intégrés à notre base de données sur les mesures *barrières* pour qu'ils soient considérés comme un critère de choix pour la construction de la gestion.

- **Les résultats de la QMRA indiquant la contribution non-négligeable des pratiques mises en place et des équipements utilisés au-delà de la filière de traitement**

Au-delà des enjeux sanitaires associés aux procédés de traitement supplémentaires, les résultats de l'évaluation des risques (QMRA) réalisée en considérant les mesures *barrières* post-traitement questionnent la pertinence de leur mise en place. En évaluant les risques à partir de la dose d'exposition et non uniquement à partir de la concentration dans les EUT, les mesures *barrières* sont alors considérées dans l'évaluation (chapitre 1). Au final, ces mesures sont déjà intégrées dans les pratiques existantes des agriculteurs (chapitre 2). Les résultats des évaluations des risques réalisées pendant les ateliers ont montré que ces mesures *barrières* existantes contribuent à atteindre les objectifs liés à la santé pour certaines populations. C'est le cas notamment pour les consommateurs même avec une eau de qualité inférieure à celle normalement requise. Bien que des interrogations persistent sur les paramètres d'exposition (volume, fréquence…) mais aussi sur la contribution des mesures *barrières* (études scientifiques à actualisation…), cela confirme néanmoins l'intérêt d'une approche systémique pour construire la gestion des risques. En effet, ces mesures *barrières* existantes assurent une gestion au-delà du traitement et donc une gestion des éventuelles re-contaminations post traitement.

L'effet cumulatif des mesures *barrières* apporte une contribution importante à la réduction des risques, en particulier pour le consommateur, et ce, même en cas d'une défaillance de l'une des mesures. Cela interroge la pertinence d'atteindre des qualités aussi strictes notamment pour les cultures alimentaires et donc la mise en place de procédés de traitement supplémentaires. Chez les participants, le dispositif a soulevé des interrogations concernant l'approche conventionnelle. Néanmoins, l'analyse *ex post* a montré que l'approche *multi-barrières* est perçue à l'issue de l'atelier comme une approche ajoutant des contraintes supplémentaires, complexifiant la gestion des risques et plus fluctuante dans la gestion effective que l'approche conventionnelle. Nous avons montré que de nombreuses barrières sont déjà en place à travers les pratiques et les équipements, ce qui indique qu'elles sont déjà effectives en pratique. Néanmoins, les retours des participants indiquent que leur contribution doit être discutée plus en profondeur et que les connaissances scientifiques ayant permis d'établir la contribution des mesures doivent être apportées. Au-delà d'un débriefing complet et d'ateliers supplémentaires, il serait intéressant de produire un guide technique pour apporter ces informations scientifiques.

- **Une méthodologie d'évaluation des risques plus précise que le suivi microbiologique et l'approche par point-barrière et qui offre des perspectives intéressantes pour d'autres usages**

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

L'approche par la dose d'exposition permet également de lever certaines limites associées à une gestion des risques basée sur les résultats du suivi microbiologique. Les indicateurs de contamination fécale utilisés pour le suivi ne sont pas toujours représentatifs des risques associés à l'utilisation des EUT (chapitre 1). De plus, ces analyses représentent des coûts non négligeables pour les projets (Lombard-Latune & Bruyère, 2023). Comme il n'est pas possible de les réaliser quotidiennement, les contaminations peuvent être identifiées après qu'elles aient eu lieu, ce qui soulèvent des interrogations concernant la gestion des risques (Drechsel *et al.,* 2022). De plus, les retours des participants indiquent que les résultats des analyses microbiologiques soulèvent des interrogations lors de la non-atteinte des seuils de qualité. Dans le cas réel de Clermont-Ferrand, les résultats de la campagne d'analyse de 2023 indiquent que les concentrations en *E.coli* dans les EUT en sortie de lagunes de maturation varient entre < 15 et 77 UFC/100mL. Concernant la valeur minimale, le seuil de détection du laboratoire réalisant actuellement les analyses ne permet pas de prouver l'atteinte d'une concentration ≤ 10 UFC/100mL bien qu'elle pourrait être atteinte. Concernant la valeur maximale, l'atteinte de cette concentration justifie-t-elle l'interdiction des cultures de la classe A ? Quels sont les risques associés à cette valeur ? L'arrêté du 02/08/2010 exigeait une concentration en *E.coli* à 250 UFC/100mL, pourquoi un tel renforcement ? La QMRA permet de réaliser des évaluations des risques associés à ces concentrations. En supposant une concentration en *E.coli* de 250 UFC/100mL, cela supposerait une concentration en norovirus et rotavirus de 2,5 x 10^{-3}/100mL (en se basant sur les ratios indiqués au chapitre 1). En considérant l'ingestion de 100gr de salade tous les deux jours pour un volume d'exposition de 12,5mL/évènement, notre modèle indique qu'avec une telle concentration en rotavirus et en norovirus les DALYs perdus par personne et par pour norovirus sont de 1,6*10^{-8} et pour rotavirus de 1,4*10^{-6}. Ces résultats sont à interpréter avec prudence puisque des ratios sont utilisés et que le modèle n'intègre pas encore les variabilités des paramètres et les incertitudes. Néanmoins, cela indique les possibilités offertes par cette approche pour évaluer les risques associés à la REUT.

Comme pour l'interprétation d'une non-atteinte des seuils de qualité, l'interprétation d'une non-atteinte du 10^{-6} DALYs pppa soulève des interrogations. Néanmoins, l'unité du DALYs permet de comparer cette non-atteinte avec d'autres causes de maladies et également de ramener les résultats à l'échelle de la population pour appuyer la prise de décision (WHO, 2016). De plus, elle permettrait de pouvoir comparer les risques associés à l'utilisation d'autres ressources en eau comme les eaux conventionnelles pour l'irrigation agricole mais aussi pour d'autres usages. Par exemple, dans la directive 2006/7/CE de l'UE sur la qualité des eaux de baignade, une eau intérieure est considérée de « bonne qualité » pour une concentration en *E.coli* de 1 000 UFC/100mL (95ème percentile). Les seuils retenus pour les Jeux Olympiques de Paris en 2024 par la Fédération internationale de natation étaient de ≤ 1 000 *E.coli* UFC/100mL (World Aquatics, 2024). Des études réalisées dans le cas de la REUT pour les usages récréatifs ont montré que les volumes ingérés étaient de 37mL pour des non-adultes et 16mL pour des adultes (Dufour *et al.,* 2006 cité par WHO, 2016a). D'autres études considèrent une ingestion jusqu'à 100mL (Asano *et al.,* 1992). Ces volumes sont supérieurs aux volumes résiduels évalués pour l'ingestion de produits irrigués avec des eaux usées (≤15mL/évènement). Ces volumes paraissent d'autant plus élevés qu'ils sont ingérés directement par les populations exposées contrairement à la REUT où les mesures *barrières* contribuent à réduire ces volumes. Les concentrations en micro-organismes pathogènes auxquelles les populations sont exposées ne sont également pas les mêmes. Par exemple, les résultats des analyses réalisées sur la Seine au niveau du parcours de natation du triathlon avant et pendant les Jeux Olympiques ont montré que, bien que les concentrations en *E.coli* n'étaient pas toujours conformes aux objectifs fixés par la Fédération internationale, les épreuves avaient été parfois maintenues (Lehot-Couette, 2024). Selon les données obtenues par Médiapart, les seuils fixés par la Fédération n'auraient été respectés que deux jours pendant le temps des épreuves de natation qui se sont déroulées du 27 juillet au 5 août avec des résultats indiquant une concentration allant jusqu'à plus de 2 420 *E.coli* UFC/100mL (Lindgaard *et al.,* 2024). Ces différences d'exigences concernant les usages de la REUT et les autres usages suscitent donc

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

un ensemble d'interrogations. Ces éléments font écho à la REUT *de facto* où les rejets des stations d'épuration sont mélangés avec les eaux de surface avant d'être utilisées par les agriculteurs. Certains auteurs comme Foschi *et al.* (2022) ont ainsi montré que la concentration en micro-organismes pathogènes diminuait avec la distance grâce aux conditions environnementales. Cependant, d'autres études ont confirmé que les concentrations dans les eaux de surface étaient parfois supérieures à celles autorisées pour la REUT (Drewes *et al.,* 2017). Des évaluations QMRA seraient donc à réaliser pour mieux comparer les risques associés à chacun des usages. Enfin, cette méthodologie se développe également pour le secteur de l'eau potable (Enault *et al.,* 2024). Elle permettrait d'harmoniser les approches méthodologiques de gestion des risques sanitaires entre les différents secteurs liés à la gestion sanitaire des ressources en eau.

L'intégration des acteurs du sanitaire semble importante pour accompagner l'utilisation de la QMRA et l'interprétation des résultats. Dingemans *et al.* (2020) recommande la mise en place d'une équipe pluridisciplinaire pour réaliser l'évaluation des risques et apporter les connaissances nécessaires. Nous avons vu dans le chapitre 2 qu'au final, la rédaction de la demande d'autorisation semblait être un processus assez horizontal entre les acteurs. La construction collective a montré l'intérêt de collaborer en amont avec l'ensemble des acteurs pour produire les données nécessaires au plan de gestion mais aussi de discuter de la méthodologie utilisée. La QMRA reste néanmoins une méthodologie complexe à utiliser. Il semble important que des formations soient mises en place pour accompagner les acteurs à son utilisation. De plus, des incertitudes persistent sur les paramètres utilisés. Au-delà d'un besoin de mieux caractériser certains paramètres et de développer un modèle permettant d'intégrer les variabilités et les incertitudes, une validation nationale des paramètres serait également nécessaire. Un besoin de mieux préciser la contribution de certaines mesures *barrières* est également important pour assurer une gestion suffisante des risques. C'est le cas notamment du dépérissement au champ. Plusieurs études ont indiqué qu'il serait nécessaire de pouvoir préciser l'abattement en fonction des micro-organismes pathogènes et d'intégrer l'impact des conditions environnementales (Bozkurt *et al.*, 2021). Un approfondissement de la base de données est donc à réaliser en se basant sur la littérature récente mais aussi sur les résultats de nouveaux projets de recherche qui seront à mener.

- **Un accompagnement des acteurs dans la gestion des risques sanitaires qui semble nécessaire**

Lors de l'analyse *ex ante,* un besoin d'accompagnement concernant la mise en œuvre du cadre réglementaire a été exprimé en particulier par les acteurs institutionnels. Bien que le dispositif reste perfectible, il semble avoir répondu à ce besoin. Cet accompagnement doit toutefois être approfondi en ouvrant la « boite noire » du modèle (Becu, 2020) et apportant les informations scientifiques qui ont permis de construire le modèle d'évaluation et de gestion. Ce besoin fait écho à l'analyse de Dingemans *et al.* (2020) concernant le plan de gestion demandé par le RE 2020/741. Ces auteurs indiquent que la construction de ce plan de gestion nécessite un vaste ensemble de connaissances, notamment scientifiques, qui risque de rendre difficile sa construction par les acteurs du terrain. Nos résultats confirment ces propos.

Les résultats montrent également que les acteurs du terrain ne sont pas toujours au courant des risques et des exigences associées au cadre réglementaire. Cela peut soulever des interrogations concernant l'application des exigences réglementaires. Les résultats du panorama Epnac concernant le remplissage des valeurs du suivi confirment ces interrogations. En effet, les résultats montrent que les classes visées et les objectifs atteints ne sont pas toujours cohérents. Les fréquences renseignées ne correspondent pas non plus systématiquement aux contraintes réglementaires. Les raisons expliquant ces résultats ne sont pas indiquées, néanmoins nos discussions avec les acteurs du terrain nous ont permis d'identifier plusieurs raisons dont des fréquences qui paraissent excessives et des coûts associés qui sont trop importants. Comme nous l'avons montré, les analyses microbiologiques

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

ont un coût non-négligeable pour les projets (chapitre 1). Avec le renforcement des fréquences de suivi, notamment pour la qualité A, va se traduire par une augmentation de ces coûts. Compte tenu de l'application actuelle de ces exigences mais aussi des limites associées à une approche basée uniquement basée sur l'atteinte des critères de qualité, une autre approche est nécessaire. L'analyse des concentrations atteintes dans les EUT est importante. Néanmoins, la QMRA permet de simuler différents scénarios sans avoir à passer des analyses microbiologiques coûteuses pour les différents micro-organismes pathogènes (WHO, 2016). Comme indiqué par Zhiteneva *et al.* (2020), des bases de données sur les micro-organismes sont nécessaires pour pouvoir accompagner l'utilisation de la QMRA.

4.2 Des filières de REUT économiquement soutenable

- **Une simulation des coûts économiques nécessaire pour construire la gestion des risques**

La construction collective de l'approche conventionnelle de gestion des risques (tour 1) a montré que d'autres facteurs influencent les choix de gestion et notamment les coûts économiques. Les coûts associés à la filière de traitement influencent également le choix de la filière au-delà des réductions log atteintes. Les ateliers ont montré qu'ils influencent également le choix de la qualité atteinte et donc des usages qui seront possibles. En effet, grâce à la caractérisation des coûts réalisés avec le bureau d'étude Ecofilae et la possibilité de simuler en direct grâce au modèle *Excel*, les joueurs ont pu collectivement réaliser une première estimation des coûts en fonction de leur choix. Bien que les coûts soient approximatifs et qu'ils étaient calculé que pour au maximum sept cultures, l'atteinte des qualités les plus strictes engendre des coûts élevés. Cela confirme donc l'impact économique d'une gestion basée uniquement sur la concentration dans les EUT. Ces coûts sont attendus comme encore plus élevés si une unité de stockage est nécessaire et qu'un réseau de distribution doit être mis en place. Dans notre modèle, les coûts d'irrigation estimés étaient inférieurs à 0,50 €/m^3. La mission Flash indique que le coût minimal serait de 0,25 € à 0,80 €/m^3 et peuvent monter jusqu'à 5 à 6 €/m^3 (Locqueville *et al.,* 2023). Les coûts estimés par le modèle pourraient correspondre à une sous-estimation des coûts. L'objectif n'est pas de réaliser une étude précise des coûts mais d'accompagner la discussion. Lors des ateliers, la projection de ces coûts a, en effet, entraîné des attitudes qui pourraient être retrouvées dans la réalité. Par exemple, l'ajout d'une unité de traitement pour quelques agriculteurs pourrait avoir des impacts importants pour les autres agriculteurs qui n'ont pas besoin de cette qualité. Ce résultat fait écho au cas réel de Clermont-Ferrand où les cultures nécessitant la qualité A représentent actuellement que quelques hectares sur les 1 500 hectares équipés. Ainsi, l'ajout d'une unité de traitement semble difficilement justifiable. Cela pourrait donc avoir des conséquences sur le développement de filières agricoles produisant des cultures alimentaires. Nous reviendrons sur cet élément dans la partie consacrée au développement de filières socialement acceptables.

- **Une comparaison limitée des coûts associés aux deux approches de gestion**

Les retours des participants indiquent que l'apport d'informations économiques est importante pour la construction de la gestion des risques. De manière générale, les récents états de lieux qui ont été menés sur la REUT en France comme le panorama EPNAC (Lombard-Latune & Bruyère, 2023) et la mission Flash (Locqueville *et al.,* 2023) ont montré que les données économiques ne sont pas toujours disponibles. Ainsi, le dispositif présente un intérêt pour les participants puisqu'ils importent ces informations bien que les estimations ne sont pas précises. Comme indiqué dans le chapitre 1, certains coûts associés aux mesures *barrières* n'ont toutefois pas pu être caractérisés. C'est le cas, par exemple, des coûts associés à l'attente d'un temps de dépérissement ou de la mise en place des distances entre

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

le périmètre irrigué et les habitations. Ces coûts seraient à caractériser afin de pouvoir comparer les impacts économiques associés aux deux approches de gestion et plus largement ceux associés aux exigences réglementaires.

- **Une simulation des coûts économiques permettant d'aborder les enjeux sociétaux associés à la REUT**

La simulation collective des coûts a également permis de faire émerger les différentes perceptions concernant la répartition des coûts et de pouvoir simuler différentes possibilités. Il est fort probable que la configuration du jeu de rôles a facilité les échanges au sujet de la répartition des coûts et a contribué à l'émergence des différentes possibilités. C'est un des caractéristiques indiquées par la littérature concernant ce genre de configurations (Piaget et Inhelder, 1966 cité par Etienne, 2023). Une des configurations envisagées pendant les trois ateliers est l'intégration d'autres acteurs dans la prise en charge des coûts comme les collectivités et donc indirectement les citoyens. Cette possibilité a engendré différentes réactions pendant les ateliers. Pour certains joueurs, l'intégration des citoyens dans la prise en charge des coûts associés à la REUT semble difficilement envisageable. Cette attitude a persisté à l'issue de l'atelier. Il aurait été intéressant de pouvoir continuer le débat dans le débriefing qui permet le retour au réel (Hassenforder *et al.,* 2020b). En effet, dans le cas réel de Clermont-Ferrand, nous avons montré en fin du chapitre 3 que la collectivité de Clermont-Auvergne-Métropole a participé aux rachats des lagunes à l'issue de la fermeture de la sucrerie Bourdon en 2019 dans le but notamment de pouvoir maintenir le projet de REUT. Concernant l'avis des citoyens, les résultats du baromètre annuel d'opinion « *Les Français et l'eau* » réalisé par le Centre d'information sur l'eau (CIEau) de 2024 indiquent que 59% des interrogés seraient prêt à payer plus cher leur eau du robinet pour financer des solutions (technologie de recyclage ou de REUT) pour moins puiser dans les ressources (CIEau, 2025). Comme indiqué par un des joueurs, il semble toutefois important que les usages agricoles bénéficiant des EUT répondent aux enjeux sociétaux concernant l'agriculture : production de cultures alimentaires répondant aux enjeux de souveraineté alimentaire, réduction des consommations en eau….

4.3 Des filières de REUT socialement acceptable

- **L'intégration des différentes parties prenantes dans la construction des scénarios**

L'intégration de l'ensemble des parties prenantes dans la construction des projets de REUT et plus largement dans la gestion de l'eau est vivement encouragée pour construire des projets répondant aux attentes de ces différents acteurs et pour ainsi assurer leur compréhension et leur acceptation (Khan & Gerrard, 2006 ; Basco-Carrera *et al.* 2017 ; Aubert *et al.,* 2018 ; Maffettone & Gawlik, 2022). Les résultats de la construction collective de la gestion des risques ont montré que l'intégration des différentes parties prenantes encourage la collaboration entre des acteurs qui n'ont pas nécessairement l'habitude de travailler ensemble. Les retours *ex post* des participants indiquent que cela permet de rencontrer les différents acteurs concernés par le projet, la compréhension des attentes et des besoins individuels mais aussi les interactions permettant de répondre à différents questionnements individuels. Le jeu de rôles contribue à se mettre à la place des autres, un effet indiqué par la littérature (Becu, 2020) et qui avait justifié notre choix pour ce format.

La compréhension des contraintes des agriculteurs a été soulignée à plusieurs reprises par les joueurs. Ce résultat peut être lié aux rôles proposés. Pour l'atelier de Clermont-Ferrand, plusieurs types de rôles étaient proposés : le représentant des habitants, la collectivité, le président de l'ASA, et les agriculteurs. Cette « asymétrie » des rôles a plusieurs objectifs : reproduire le système d'interactions sociales observé dans la réalité, accentuer le processus de décentration pour renforcer les

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

apprentissages relationnels et collaboratifs à travers une inversion des rôles ou par les éléments du cadre du jeu … Nous avions attribué le rôle de la collectivité au participant de la CAM, le rôle du président de l'ASA à l'agriculteur membre de l'ASA LN et le rôle des habitants au participant de la mairie de Saint Beauzire. Les retours des participants indiquent que cette configuration a limité la mise de côté de la réalité ainsi que l'engagement dans la simulation. L'indication d'une incompréhension du dispositif et d'un manque d'intérêt de la part du membre de l'ASA peut être lié à son rôle qui avait un faible pouvoir d'action et qui le distinguer des autres participants. Le participant de la CAM a indiqué un fort intérêt pour le dispositif mais également une frustration à jouer son propre rôle. Ce résultat est retrouvé dans d'autres études (Gourmelon, 2017 cité par Becu, 2020). Par la suite, nous avons choisi de supprimer le rôle des habitants (Drôme) puis de supprimer le rôle de la collectivité pour les joueurs et de le faire incarner par un facilitateur et de proposer que des rôles d'agriculteurs (Porquerolles). Au final, nous pouvons nous questionner des effets associés à ce choix sur les participants concernant le positionnement des agriculteurs comme acteur central de la gestion des risques pour la REUT. Certains joueurs se sont en effet interrogés sur le transfert des responsabilités aux agriculteurs que l'application de l'approche *multi-barrières* pourrait amener. L'objectif de cette approche est plutôt d'encourager une gestion des risques sur l'ensemble de la filière et de pouvoir prendre en considération la contribution des pratiques et des équipements existants dans la réduction des risques pour éviter une « surenchère » au niveau du traitement. Les enjeux associés au partage des responsabilités ont été abordés lors des ateliers mais de manière succincte et doivent être approfondis. Néanmoins, ces premiers ateliers indiquent l'intérêt du dispositif pour intégrer les différents acteurs dans cette discussion et notamment les acteurs opérationnels.

- **L'intégration des attentes des différentes parties prenantes et des spécificités locales**

Concernant les agriculteurs, par exemple, des avis ont été apportés sur différents aspects de la gestion et notamment sur les mesures *barrières* existantes et celles qui pourraient être mises en place. Par exemple, les EPI ou le changement des systèmes d'irrigation ne sont pas toujours des mesures de gestion désirables par ces acteurs. Au-delà de la désirabilité, certaines mesures ne sont pas pertinentes par rapport au contexte local ou bien leur contribution ne sera pas effective. C'est le cas, par exemple, de la prise en compte d'un temps de dépérissement entre la dernière irrigation et la castration manuelle du maïs semence dans le contexte de la Drôme. Nous retrouvons donc bien les intérêts indiqués par la littérature concernant l'intégration de ces acteurs (Keraita *et al.,* 2008) ainsi que les recommandations de la Commission Européenne (Maffettone & Gawlik, 2022).

Les autres acteurs, notamment institutionnels et scientifiques, ont pu également exprimer leurs attentes et leurs perceptions et également « faire passer des messages » (Becu, 2020). Les acteurs de la société civile ont également été intégrés au dispositif, des acteurs qui sont indiqués comme assez peu mobilisés sur les sujets liés aux risques sanitaires associés à la REUT. C'est donc une première tentative d'une construction collective de la gestion des risques avec un large panel d'acteurs de la REUT. L'inclusion des différentes parties prenantes a montré que cela permettait d'intégrer d'autres dimensions que les enjeux sanitaires à la construction de la gestion des risques comme les préoccupations sociales, économiques ou encore techniques. Cette approche transdisciplinaire permet également de faire émerger les préoccupations individuelles sur le sujet, de les intégrer à la construction et de trouver certaines réponses grâce aux autres participants. Elle contribue donc à produire des solutions pertinentes localement pour les acteurs concernés à partir d'un cadre générique qui est le cadre réglementaire et le modèle proposé par l'outil, spécifiques au contexte, et suffisamment flexibles pour prendre en compte les événements inattendus à venir (Hazard et al., 2018 cité par Etienne, 2023).

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

- **La construction de filières de REUT répondant à différents enjeux sociétaux : alimentaire, environnemental, flexibilité…**

La simulation collective des coûts économiques associés à l'ajout de procédés de traitement supplémentaires a mis en lumière les conséquences sociales que pourraient également entraîner le renforcement des exigences de qualité. En effet, comme indiqué dans la section précédente, l'atteinte de la qualité la plus stricte n'est pas nécessairement désirable pour l'ensemble des agriculteurs. La co-construction de l'outil avec les acteurs de Clermont-Ferrand a permis d'identifier que les cotisations des agriculteurs contribuaient au fonctionnement du projet de REUT (traitement supplémentaire, fonctionnement du réseau de distribution, suivi analytique…). Ces cotisations sont calculées à partir de la surface irriguée et du volume d'eau consommé. Cela confère donc un certain pouvoir décisionnel aux agriculteurs ayant les plus grosses consommations. Si ces agriculteurs n'ont pas besoin des qualités les plus strictes, cela pourrait bloquer l'investissement dans une filière de traitement supplémentaire. Ainsi, des restrictions sur l'usage pourraient être mises en place et contraindre les agriculteurs dont les cultures appartiennent aux classes de qualité les plus élevées. Ces agriculteurs seraient donc pénalisés par rapport aux agriculteurs appartenant aux autres classes de qualité créant ainsi des inégalités d'accès à la REUT. De plus, ces cultures contribuent à la souveraineté alimentaire, qui est un enjeu national comme le montrent les projets alimentaires territoriaux (PAT). L'application de restrictions d'usage pour ces cultures soulève des interrogations concernant la contribution de la REUT à répondre aux enjeux sociétaux et à la construction de filières de REUT socialement désirable.

Les résultats de la QMRA ont également amené certains joueurs à questionner la pertinence d'atteindre la qualité A. Ainsi, en prenant en considération la contribution des pratiques existantes et des équipements utilisés, l'ajout d'une unité de traitement supplémentaire ne serait pas nécessairement obligé pour assurer une protection suffisante des populations exposées. La construction de filières de REUT adaptables et résilientes aux évolutions notamment climatique semble essentielle. Pour cela, il semble important de pouvoir maintenir une certaine flexibilité dans le choix des assolements sans être contraint par des capacités de traitement. Au-delà de l'affranchissement des impacts économiques mais aussi des contraintes organisationnelles associées aux procédés, cela pourrait également contribuer à des filières de REUT plus durables d'un point de vue environnemental. En effet, comme indiqué en introduction, les émissions des services d'eau et d'assainissement représentent entre 3 et 7% des émissions de gaz à effets de serre des villes (Alix *et al.,* 2022). Une massification de la REUT, et donc des procédés de traitement supplémentaire, pourrait contribuer à une augmentation de ces émissions. Certains auteurs se sont intéressés aux impacts environnementaux des procédés de traitement et à leur considération dans la construction des filières de REUT (Carré *et al.,* 2017 ; Kalboussi *et al.,* 2022). Les résultats ont confirmé les impacts non-négligeables de ces procédés compte tenu des besoins énergiques ou encore des produits chimiques utilisés. Compte tenu de la densité des données identifiées pour les impacts sanitaires, organisationnels et économiques mais aussi la complexité associée à la caractérisation des impacts environnementaux, ces éléments n'ont pas pu être abordés pendant la thèse. Néanmoins, ils nous semblent être des facteurs d'influence importants à ne pas négliger pour la construction de la gestion des risques, en particulier dans des contextes de dérèglement climatique. Des outils comme l'Analyse du cycle de vie (ACV) pourraient être mobilisés. La caractérisation des impacts environnementaux associés aux mesures *barrières* semblent d'autant plus intéressante que certaines mesures contribuent aux enjeux associés au dérèglement climatique et aux tensions sur les ressources en eau. Par exemple, l'utilisation des systèmes d'irrigation à faible pression et/ou localisés (goutte à goutte, microaspersion…) est encouragée pour adapter l'agriculture au manque d'eau en augmentant l'efficacité de l'irrigation (INRAE, 2022).

- **Une composition des ateliers pas toujours représentative**

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

La composition des ateliers n'était néanmoins pas toujours représentative des différentes parties prenantes concernées par la gestion des risques. Par exemple, pour les trois ateliers, les distributeurs des produits finaux qui n'ont pas été conviés. Ces acteurs pourraient mettre en place des mesures *barrières* comme les préparations post-récolte ou exiger leur mise en place à l'échelle des agriculteurs. D'autres ateliers seraient donc à réaliser en intégrant ces acteurs. Pour l'atelier de Porquerolles, certains acteurs n'ont pas été conviés comme l'ARS. Ce choix a été fait en fonction des objectifs associé à l'atelier mais présente des limites concernant les résultats produits. Les ateliers réalisés dans la Drôme et Clermont-Ferrand intégrant un plus large panel d'acteurs ont montré les intérêts associés. Des réflexions doivent être menées sur la composition des ateliers pour assurer une construction collective représentative des attentes des différentes parties prenantes. Néanmoins, l'intégration des différents acteurs dans les dispositifs participants n'est pas toujours évidente. Par exemple, dans notre cas, l'association de consommateurs UFC Que Choisir a été sollicité pour l'atelier de Clermont-Ferrand mais ont néanmoins décliné l'invitation. Comme indiqué par Noury (2021), les acteurs de la société civile sont encore assez absents sur la thématique de la REUT. Cela pourrait éventuellement expliquer ce résultat. Cependant, compte tenu des objectifs de massification associés à la REUT en France et les retours d'expérience des autres pays indiquant l'importance de ne pas négliger ces acteurs pour assurer une REUT « socialement acceptable », il semble important de pouvoir les intégrer dans les réflexions.

- **Une construction collective dont la portée des résultats est questionnée**

Il est attendu que l'intégration des différentes parties dans le processus de construction contribue à la production de décisions partagées. Au-delà de l'absence de certains acteurs, les retours *ex post* ont montré que les résultats produits n'étaient toutefois pas partagés par l'ensemble des participants. L'absence d'un réel débriefing est sûrement une des raisons à ce résultat, de même que l'absence d'ateliers supplémentaires pour confronter les résultats mais aussi aborder le cas réel. Dans le cas de Clermont-Ferrand, ce deuxième atelier a été mené avec les porteurs de projet (ASA LN et Somival Ingénierie). Un atelier supplémentaire devait être réalisé en fin d'année avec l'ensemble des acteurs mais il n'a pas pu avoir lieu. Certains acteurs sont donc repartis avec des questionnements et des frustrations à l'issue de l'atelier. De plus, les mesures *barrières* à mettre en place pour les cultures de la classe A n'ont pas été clairement définies. Les contributions associées au dispositif au-delà des ateliers sont donc questionnables, de même que la production de décisions partagées. Les résultats dans le réel à long terme n'ont également pas été évalués, notamment concernant la projection des acteurs vers une approche de gestion *multi-barrières* plutôt que conventionnelle. De plus, des interrogations persistent sur l'application des mesures *barrières* dans la réalité notamment celles qui reposent sur la responsabilité individuelle. Certaines mesures, comme le port des EPI, nécessitent parfois un changement de comportement chez les acteurs (Drechsel *et al.,* 2022). Les processus participants peuvent être vecteur de changements d'ordre comportemental à l'échelle de l'individu (Becu, 2020). Au-delà des agriculteurs, des changements comportementaux pourraient avoir lieu au niveau des consommateurs. Leur intégration dans la gestion des risques fait toutefois débat comme l'ont montré les résultats sur les projets d'arrêtés de la consultation publique (Gouvernement français, 2023b) et de l'avis de l'Anses (Anses, 2023). L'apport d'informations concernant les risques peut susciter des réactions hétérogènes, comme nous l'avons vu avec un des participants observateurs de la société civile et comme l'indique la littérature (Garin *et al.,* 2021 ; Noury, 2021). Néanmoins, leur intégration répond aux enjeux de la sécurité sanitaire des aliments « *de la fourche à la fourchette* » encourageant une gestion de la production primaire à la préparation finale et le lieu de consommation (Anses, 2021a). L'effet du dispositif sur les comportements serait à explorer plus en profondeur, de même que sur les changements institutionnels concernant l'intégration de l'approche *multi-barrières.*

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

En résumé, le dispositif a montré un certain nombre d'intérêts pour accompagner la construction collective mais doit être repensé sur certains points comme nous allons le voir dans la prochaine partie.

4.4 Un dispositif qui présente des perspectives intéressantes

L'étude de Sampaio *et al.* (2024) recense différents outils d'aide à la décision fréquemment utilisés pour la REUT dont l'évaluation des risques (dont la QMRA), les ACV ou encore les analyses de décision multicritères. Les échanges que nous avons eus avec les acteurs du terrain lors des différents temps de co-construction ou d'utilisation de l'outil nous amènent à interroger la mobilisation de ces outils au-delà du cadre académique. Ces interrogations portent également sur la mobilisation des résultats issus des études scientifiques et des méthodologies développées. Comme l'indiquent Goodwin *et al.* (2015), des méthodologies plus opérationnelles doivent être développées pour accompagner la construction des plans de gestion des risques pour la REUT. L'utilisation de la simulation participative a déjà montré son intérêt pour aborder les risques et leur gestion. C'est le cas, par exemple, du dispositif LittoSIM qui est utilisé pour la gestion du risque de submersion marine développé par différents chercheurs (Laatabi *et al.* 2022) et notamment Becu dont les réflexions ont contribué à construire mes recherches (Becu, 2020). A notre connaissance, il n'existait pas de tel dispositif pour la gestion des risques pour la REUT. Les résultats issus des ateliers indiquent que le dispositif semble être un vecteur intéressant pour transférer les connaissances académiques et aborder leur complexité tout en permettant également l'apport de connaissances des acteurs du terrain et une réflexivité de l'ensemble des connaissances académiques et non-académiques. Il offre également des perspectives intéressantes pour opérationnaliser le cadre réglementaire et accompagner sa mise en œuvre sur le terrain. Les résultats ont également montré différentes « limites » associés au dispositif, qui nous ont permis d'identifier des pistes d'amélioration et des perspectives pour intégrer d'autres éléments.

- **L'importance de réaliser différents ateliers pour aborder les questionnements persistants et travailler le cas réel**

Comme nous l'avons vu dans le chapitre 3, la configuration du dispositif sous forme d'un de jeu rôles a suscité des attitudes hétérogènes chez les participants. Ces attitudes ont souvent été justifiées par le besoin d'aborder le cas réel. Compte tenu des effets démontrés du format du jeu de rôles pour accompagner la construction collective (se mettre à la place de l'autre, mettre de côté de la réalité pour explorer de nouvelles possibilités, contribution à l'apprentissage cognitif et relationnel…), le maintien de ce format semble important. Ainsi, différents niveaux d'utilisation de l'outil ont été réfléchis à l'issue des ateliers (Tableau 32).

Niveau		Objectif	Configuration du dispositif
1	« Appropriation »	S'approprier collectivement les notions associées aux risques et leur gestion et le modèle d'évaluation et de gestion Créer du lien collaboratif entre les parties prenantes	Simulation exploratoire à partir d'un cas fictif (jeu de rôles « computer-assisted ») Utilisation d'une version déterministe (valeurs fixes) du modèle QMRA
2	« Exploration »	Explorer des scénarios de gestion des risques pour un système existant ou futur (gestion en place, nouvelles possibilités…)	Simulation exploratoire à partir du cas réel (« computed-based ») Utilisation d'une version probabiliste du modèle QMRA
3	« Plan de gestion des risques »	Explorer des scénarios de gestion pour un système existant en vue de sa mise en conformité vis-à-vis du nouvel arrêté ou pour projet en construction en vue de la production du plan de gestion nécessaire à la demande d'autorisation	Simulation exploratoire à partir du cas réel (« computed-based ») Utilisation d'une version probabiliste du modèle QMRA

Tableau 32 : Trois niveaux d'utilisation qui pourraient être envisagés pour l'outil MUTLIWARE

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

Le jeu de rôles est utilisé lors du premier niveau. L'ordinateur est utilisé à des fins calculatoires et d'enregistrement des décisions, c'est ce que Becu appelle une configuration de simulation « computer-assisted » (Becu, 2010 cité par Becu, 2020). Le cas fictif est « générique », c'est-à-dire qu'il est « *transposable d'un site à l'autre grâce à des modifications et des adaptations relativement mineures par rapport à la version initiale* » (Becu, 2020). Des réflexions sont à mener concernant l'intérêt d'éventuelles modifications ou adaptations par rapport à la version initiale. Il pourrait finalement être intéressant de construire qui reste similaire pour les différents ateliers mobilisant le niveau 1. Ce cas fictif permettrait d'aborder les notions clés : les différentes cultures irriguées et les qualités requises, les populations exposées etc. Néanmoins, il semble important de trouver un juste milieu entre un modèle « abstrait » permettant aux acteurs d'explorer les possibilités et un modèle « réaliste » permettant une certaine projection par rapport au cas réel. De nombreux auteurs se sont intéressés aux effets du niveau de réalisme du modèle (Becu, 2020). Ces éléments sont à explorer pour construire le cas fictif. Une attention particulière doit être portée au débriefing qui a été limité pour les trois ateliers. C'est un temps de réflexion collectif essentiel pour opérer un travail réflexif chez les participants et viser un « *épanouissement cognitif, social et politique* » (Crookall, 2010 ; Becu, 2020).

Concernant les niveaux 2 et 3, le jeu de rôles n'est plus mobilisé. La simulation est centrée autour de l'ordinateur, ce que Becu appelle « computer-based ». Les données du modèle sont adaptées dans la mesure du possible au cas réel ou en construction. Pour ces niveaux, la version « probabiliste » du modèle qui a commencé à être élaborée pendant la thèse doit être finalisée. Les variabilités des paramètres doivent être intégrées ainsi que les incertitudes afin d'évaluer plus précisément les risques. La méthode de Monte Carlo, qui permet de réaliser un certain nombre de simulations aléatoires en se basant sur des distributions de probabilités, est couramment utilisée dans les études QMRA (WHO, 2016 ; Zhiteneva *et al.,* 2020). Certains auteurs mobilisent également les méthodes bayésiennes, qui permettent de calculer des probabilités en combinant des connaissances préalables avec de nouvelles données pour ajuster progressivement les estimations (Beaudequin *et al.,* 2015 ; Massiot *et al.,* 2023).

- **Des réflexions à mener concernant le déploiement du dispositif**

Ainsi, pour chaque cas d'étude, plusieurs ateliers seraient nécessaires pour pouvoir mobiliser les différents niveaux. Compte tenu de l'influence des participants sollicités dans la production des résultats, il serait nécessaire de réaliser plusieurs ateliers pour chacun des niveaux. Pour le cas de Clermont-Ferrand et de la Drôme, chaque atelier a été réalisé sur une demi-journée. Pour le cas de Porquerolles, il a été réalisé sur une journée entière. Les différents temps de co-construction de l'outil et de son utilisation nous ont montré que la mobilisation des parties prenantes n'est pas toujours évidente. C'est une contrainte souvent associée aux processus participants (Goodwin *et al.,* 2019b). La durée et la fréquence des ateliers organisés pour chaque cas d'étude doit donc être réfléchie en amont de la mise en place du processus participatif (Hassenforder *et al.,* 2015). Au-delà des réflexions à mener sur la durée et l'organisation, le transfert du dispositif en dehors du cadre de la recherche doit être réfléchi. En effet, en incarnant le rôle de l'animatrice pour les trois ateliers et également pour les sessions de test de l'outil, j'ai pu réaliser les enjeux associés à ce rôle. C'est un rôle qui peut s'avérer complexe et qui nécessite une réflexion éthique quant aux risques de manipulation que ce rôle peut impliquer. De plus, il nécessite également de trouver un juste milieu entre l'effacement pour ne pas influencer les résultats et l'accompagner des acteurs dans le processus de simulation exploratoire. Des réflexions doivent être menées concernant le déploiement du dispositif et également pour accompagner la mobilisation des résultats produits.

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

- **L'intégration d'autres usages, d'autres risques, d'autres enjeux …**

L'évaluation *ex ante* a montré que la perception d'autres risques sanitaires que les risques microbiologiques influençaient également la perception des acteurs. C'est le cas notamment des risques chimiques, et en particulier les micropolluants, qui suscitent de nombreux interrogations chez les acteurs du terrain. Actuellement, le cadre normatif n'impose pas d'exigences concernant ces risques. Néanmoins, leur prise en considération dans les évaluations des risques sanitaires pour la REUT semble nécessaire. En effet, des recherches scientifiques ont été menées sur le sujet en France. C'est le cas de l'étude de Aemig *et al.* (2020) qui se sont intéressés à l'impact potentiel d'une centaine de micropolluants rejetée en sortie de station d'épuration sur la santé humaine et les milieux aquatiques. Les auteurs ont montré que les micropolluants ont des impacts potentiels variables mais significatifs. Ce sujet a également été abordé par d'autres auteurs (Helmecke *et al.,* 2020).

L'arrêté du 28/07/2022 relatif au dossier de demande d'autorisation exige également une évaluation des risques environnementaux. Les échanges avec les acteurs de Clermont-Ferrand concernant la rédaction de ce dossier ont indiqué un besoin d'accompagnement également sur ces sujets.

Les enjeux quantitatifs ont également été abordés à plusieurs reprises pendant les ateliers. Ces enjeux sont liés aux enjeux sanitaires, en particulier dans le cas d'une approche de gestion conventionnelle puisque les volumes d'EUT nécessaires vont influencer le dimensionnement de la filière de traitement. Le panorama Epnac montre que les usages de REUT se diversifient (Lombard-Latune & Bruyère, 2023). Compte tenu de la possibilité d'un multi-usages à l'échelle des projets, l'intégration des autres usages dans l'outil est donc nécessaire. Des paramètres d'exposition sont mentionnés dans les directives australiennes concernant d'autres usages que les usages agricoles (NRMMC *et al.,* 2022). Des études ont également été identifiées lors de l'état de l'art (Busgang *et al.,* 2018).

Ces évolutions du modèle sont donc à travailler. La montée en complexité de l'outil, qui s'avère déjà complexe, doit être toutefois réfléchie.

A travers cette thèse, une analyse des apports que pourraient avoir une construction collective de la gestion des risques microbiologiques pour des filières de REUT durables a été menée. Un outil de simulation participative a été co-construit avec une partie des acteurs de Clermont-Ferrand. Il a été montré qu'une approche trandisciplinaire mobilisant des acteurs académiques et non-académiques est nécessaire pour assurer une gestion suffisante des risques sanitaires pour l'ensemble des populations exposées tout en considérant d'autres facteurs comme les enjeux techniques, économiques, environnementaux ou encore sociaux. La considération de ces facteurs semble essentielle pour que la REUT soit une réponse aux enjeux d'une gestion résiliente et concertée des ressources en eau.

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

Annexes

Annexe 1 : Méthode utilisée pour estimer les DALYs perdus attribuables à rotavirus

Box 3.1 Disability-adjusted life years

The various hazards that can be present in water can have very different health outcomes. Some outcomes are mild (e.g. diarrhoea), whereas others can be severe (e.g. cholera, haemolytic uraemic syndrome associated with *Escherichia coli* O157 or cancer). Some are acute (e.g. diarrhoea), whereas others are delayed (e.g. infectious hepatitis or cancer). Some especially relate to certain age ranges and groups (e.g. skeletal fluorosis in older adults often arises from long-term exposure to high levels of fluoride in childhood; infection with hepatitis E virus has a very high mortality rate among pregnant women). In addition, any one hazard may cause multiple effects (e.g. gastroenteritis, Guillain-Barré syndrome, reactive arthritis and mortality associated with *Campylobacter*).

In order to support public health priority setting, a common metric is required that can be applied to all types of hazard and takes into account different health outcomes, including probabilities, severities and duration of effects. The disability-adjusted life year (DALY) provides this metric.

The basic principle of the DALY is to weight each health impact in terms of severity within the range of 0 for good health to 1 for death. The weighting is then multiplied by duration of the effect and the number of people affected. In the case of death, duration is regarded as the years lost in relation to normal life expectancy. Using this approach, a mild diarrhoea with a severity weighting of 0.1 and lasting for 7 days results in a DALY of 0.002, whereas death resulting in a loss of 30 years of life equates to a DALY of 30.

Hence, DALY = YLL (years of life lost) + YLD (years lived with a disability or illness). In this context, *disability* refers to a condition that detracts from good health.

For example, infection with rotavirus (in developed countries) causes:

- mild diarrhoea (severity rating of 0.1) lasting 7 days in 97.5% of cases;
- severe diarrhoea (severity rating of 0.23) lasting 7 days in 2.5% of cases;
- rare deaths of very young children in 0.015% of cases.

The DALY per case can then be calculated as follows:

$$\begin{aligned} \text{DALY} &= (0.1 \times 7/365 \times 0.975) + (0.23 \times 7/365 \times 0.025) + (1 \times 70 \times 0.00015) \\ &= 0.0019 + 0.0001 + 0.0105 \\ &= 0.0125 \end{aligned}$$

Infection with *Cryptosporidium* can cause watery diarrhoea (severity weighting of 0.067) lasting for 7 days with extremely rare deaths in 0.0001% of cases. This equates to a DALY per case of 0.0015.

Further information on the use of DALYs in establishing health-based targets is included in the supporting document *Quantifying public health risk in the WHO Guidelines for drinking-water quality* (Annex 1).

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

Annexe 2 : Méthodologie utilisée par l'OMS pour définir les objectifs de réduction indiqués pour atteindre les objectifs liés à la santé

Extrait de l'Encadré 4.1 présenté p.96 des directives de la version française des directives de 2006 publiée en 2012) intitulé « Définition des objectifs en matière de performances antimicrobiennes dans le cas de l'irrigation sans restriction » :

Cet exemple explique comment la procédure en cinq étapes présentée dans la partie 4.1 peut être utilisée pour définir un objectif opérationnel lié à la santé pour l'irrigation sans restriction de cultures avec des eaux usées traitées. Les valeurs des paramètres intervenant dans les étapes 2 à 4 n'ont été choisies que pour illustrer cette procédure.

Étape 1 : risque d'infection tolérable

Comme expliqué dans la partie 4.1, le risque d'infection à rotavirus « dimensionnant » (déterminant le dimensionnement de l'installation) est de 10^{-3} par personne et par an.

Étape 2 : QMRA

On calcule l'exposition des consommateurs aux agents pathogènes en utilisant les valeurs indicatives suivantes des paramètres dans la QMRA :

- *5000 rotavirus par litre d'eaux usées non traitées ;*
- *10 ml d'eaux usées non traitées restant sur 100 gr de laitue après l'irrigation ;*
- *100 gr de laitue consommés par personne tous les deux jours sur l'ensemble de l'année.*

La dose de rotavirus par exposition (d) désigne le nombre de rotavirus sur 100 gr de laitue au moment de la consommation. Cette dose est déterminée par QMRA, en appliquant les équations suivantes (Haas et al., 1999).

a) Conversion du risque d'infection tolérable de 10^{-3} par personne et par an en risque d'infection par personne et par événement exposant (c'est-à-dire par consommation de 100 gr de laitue, ce qui se produit tous les deux jours sur l'ensemble de l'année) [$P_I(d)$] :

$$P_I(d) = 1 - (1 - 10^{-3})^{(1\ /\ (365/2)} = 5{,}5\ \times 10^{-6}$$

b) Calcul de la dose par événement exposant à partir de l'équation dose-réponse ß-Poisson

$$P_I(d) = \ 1 - (1 + (d/N_{50})(2^{\frac{1}{\alpha}} - 1)^{-\alpha}$$

c'est-à-dire

$$d = (1 - (P_I(d))^{-1/\alpha} - 1)\ /\ (N_{50}\ /\ (2^{\frac{1}{\alpha}} - 1)$$

où les « constantes d'infectiosité » adimensionnelles pour les rotavirus valent N50 = 6,17 et α = 0,253. Par conséquent :

$$d = (1 - (5{,}5\ \times 10^{-6})^{-1/0{,}253} - 1)\ /\ (6{,}17\ /\ (2^{\frac{1}{0{,}253}} - 1)\ =\ 5\ \times 10^{-5}$$ *par évènement exposant*

Étape 3 : réduction des agents pathogènes nécessaire

Cette dose de 5×10^{-5} rotavirus est contenue dans les 10 ml d'eaux usées restant sur les laitues au moment de la consommation – la concentration de rotavirus étant donc de 5×10^{-3} par litre. Le nombre de rotavirus dans les eaux usées brutes est de 5000 par litre et la réduction des agents pathogènes nécessaire en unités logarithmiques décimales est donc de :

$$log_{10}\ (5000) -\ log_{10}\ (5\ \times 10^{-3}) = 3{,}7\ \times (-2{,}3) = 6$$

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

Annexe 3 : Micro-organismes pathogènes de référence et paramètres associés pour le modèle QMRA

		Concentration dans les eaux usées			**Modèle Dose Reponse**							**Caractérisation du risque**					
Type	*Pathogène*	Fixe	*Unité*	*Ref*	*Modèle*	*α*	*β*	*r*	*P*	*μ*	*Ref*	*DALYs /mal*	*Ref*	*Ratio mal /inf*	*Ref*	*F*	*Ref*
Bactérie	Campylobacter jejuni	10^2	Nb/ 100mL	WHO, 2006 ; Mara *et al.,* 2007	Beta-poisson	0,145	7,59		-		- -	Haas *et al.,* 1999 cité par WHO, 2006	4,6 x 10^{-3}	Havelaar et Melse, (2003) cité par WHO (2006 ; 2022)	0,3	Havelaar and Melse, 2003 cité par WHO, 2006 et WHO, 2022	1	WHO, 2006
Virus	Rotavirus	10^2	Nb/ 100mL	WHO, 2006 ; Mara *et al.,* 2007	Beta-poisson	0,253	0,426	-	-	-		Haas *et al.,*1999 cité par WHO, 2006	1,4 x 10^{-2}	Havelaar et Melse, (2003) cité par WHO (2006 ; 2022)	0,5	Havelaar and Melse, 2003 cité par WHO, 2006	0,006	WHO, 2006
Virus	Norovirus	10^2	Nb/ 100mL	Mara and Sleigh, 2010	Fractionnal Poisson	-	-	-	0,722	1106		Messner *et al.,* 2014 cité par Courault *et al.,* 2017 et Zhiteneva *et al.,* 2021	6,23 x 10^{-2}	Barker *et al.* (2013) et Mok *et al.* (2014) cités par Zhiteneva *et al.* (2021)	0,67	Atmar *et al.* (2013) cité par Zhiteneva *et al.* (2021)	1	WHO, 2006
Protozoaire	Cryptosporidium parvum	10^1	Nb/ 100mL	WHO, 2006 ; Mara *et al.,* 2007	Exponentiel	-	-	0,0572	-	-		QMRA Wiki ; NRMMC *et al.,* 2006	1,5 x 10^{-3}	Havelaar et Melse, (2003) cité par WHO (2006 ; 2022)	0,7	WHO, 2022	1	WHO, 2006

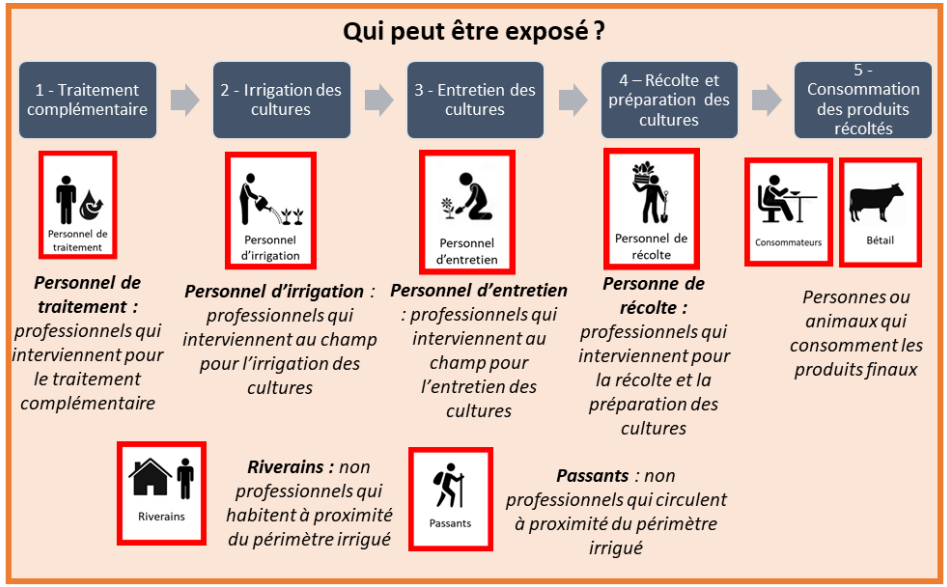
Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

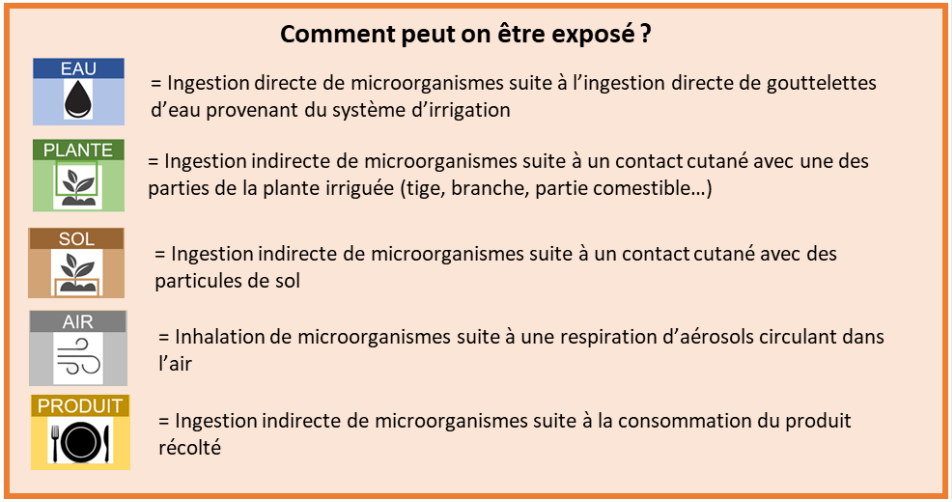
Annexe 4 : Résumé des différents acteurs clés identifiés lors de l'atelier « ARDI »

Acteurs	Catégorie attribuée	Description du rôle / information fournie
Comité de suivi	Autres	Structure rassemblant les différentes parties prenantes.
Agence de l'eau Loire-Bretagne (AE LB)	Institutionnel	Apporte des éléments concernant le volet quantitatif et peut fournir d'éventuelles subventions.
ARS	Institutionnel	Depuis le décret n°2023-835 du 29 août 2023 relatif aux usages et aux conditions d'utilisation des eaux de pluie et des eaux usées traitées, l'ARS n'est plus en charge de l'instruction mais peut être saisie par le préfet pour donner son avis sur le dossier de demande d'autorisation.
CODERST	Institutionnel	Cette commission consultative est chargée d'émettre un avis sur le dossier.
DDT 63	Institutionnel	Elle assure l'instruction du dossier. Elle ne fait pas la réglementation mais assure son adaptation au terrain.
Département du Puy-de-Drôme ; Région Auvergne Rhône Alpes	Institutionnel	Elles apportent également subventions. Les projets REUT peuvent s'inscrire dans les projets de territoire pour la gestion de l'eau (PTGE) ou alimentaires (PAT) et potentiellement bénéficier de ces aides.
Agriculteurs /membres de l'ASA LN	Opérationnel	Trois catégories sont distinguées: céréaliers, légumes plein champ et maraîchers. Les agriculteurs sont également parfois consommateurs des produits.
ASA LN	Opérationnel	Cette entité joue un rôle clé en tant que gestionnaire des lagunes et de suivi de la qualité mais aussi en tant qu'unité structurante et représentative de ses membres.
Autres structures pour l'appui technique	Opérationnel	D'autres acteurs techniques contribuent comme la Chambre d'Agriculture, les syndicats d'irrigation ou encore les Centre d'Etude et Technique Agricole (CETA) sur les questions agronomiques ou liées aux systèmes d'irrigation. La Mutualité sociale agricole (MSA) a aussi été mentionnée pour son rôle dans la protection des travailleurs permanents et saisonniers mais aussi des familles. Elle avait été impliquée dans l'étude épidémiologique menée en 2001 (Devaux *et al.* 2001).
CAM	Opérationnel	Cette entité joue un rôle clé dans la qualité l'eau fournie à l'ASA LN.
Distributeurs	Opérationnel	Ils assurent la distribution des produits finaux. Ils peuvent parfois un cahier des charges et des obligations concernant la qualité de l'eau avec des demandes de preuves de suivi ainsi qu'un délai entre la dernière irrigation et la récolte.
SOMIVAL Ingénierie	Opérationnel	Ce bureau d'étude accompagne l'ASA LN sur les aspects techniques et administratifs. Il est en charge de rédiger le dossier de demande d'autorisation.
CNRS	Scientifique	Elle apporte également de connaissance scientifiques. Le CNRS joue un rôle pour le suivi des substances émergentes mais également des micro-organismes pathogènes. La STEP de Clermont-Ferrand a fait partie du réseau OBEPINE, le réseau national de surveillance du SAR COV V2. Cela avait produit des données importantes pour maintenir l'irrigation tout en assurant la gestion des risques sanitaires pendant la campagne de 2020.
Université de CF	Scientifique	Elle avait participé à l'étude épidémiologique. Elle apporte des connaissances scientifiques sur les risques sanitaires.
Associations environnementales	Société civile	Elles surveillent les impacts environnementaux des projets.
Consommateurs	Société civile	Des acteurs importants en particulier pour les cultures alimentaires. Ils assurent le soutien des filières. Ils peuvent être représentés par les associations de consommateurs (plus faciles à associer car ce sont des entités plus structurées).
Maires des communes	Société civile	Elles représentent les habitants à proximité des périmètres irrigués et les utilisateurs des chemins de passage sont à considérer.

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

Annexe 5 : Exemple d'une fiche « joueur » aidant à la construction des scénarios



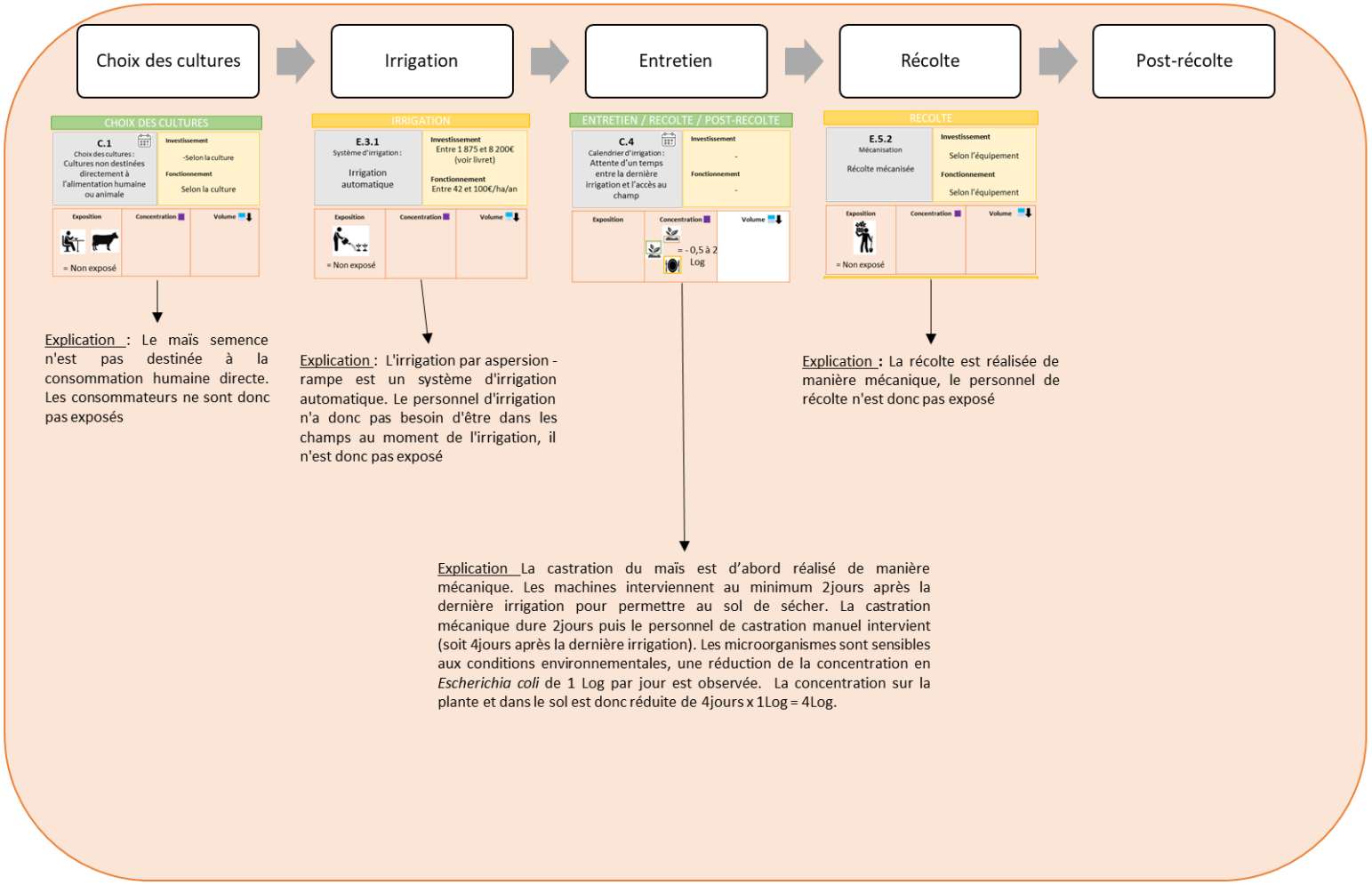




Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

Annexe 6 : Exemple d'une fiche « joueur » indiquant les mesures barrières mises en place

Agriculteur 1 - Quelles mesures sont déjà mises en place pour réduire les risques ?



Explication : Le maïs semence n'est pas destinée à la consommation humaine directe. Les consommateurs ne sont donc pas exposés

Explication : L'irrigation par aspersion - rampe est un système d'irrigation automatique. Le personnel d'irrigation n'a donc pas besoin d'être dans les champs au moment de l'irrigation, il n'est donc pas exposé

Explication : La récolte est réalisée de manière mécanique, le personnel de récolte n'est donc pas exposé

Explication La castration du maïs est d'abord réalisé de manière mécanique. Les machines interviennent au minimum 2jours après la dernière irrigation pour permettre au sol de sécher. La castration mécanique dure 2jours puis le personnel de castration manuel intervient (soit 4jours après la dernière irrigation). Les microorganismes sont sensibles aux conditions environnementales, une réduction de la concentration en *Escherichia coli* de 1 Log par jour est observée. La concentration sur la plante et dans le sol est donc réduite de 4jours x 1Log = 4Log.

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

Annexe 7 : Entités présentes aux différents temps d'adaptation de l'outil pour l'atelier de de la Drôme

			PARTICIPANTS												OBSERVATEURS / AIDE A LA FACILITATION	
Atelier	**Date**	**Objectif**	SUEZ (OP)	SATESE (OP)	Chambre d'agriculture (OP)	SIID (OP)	Agri (OP)	DDT (INS)	3CPS (OP)	CCVD (OP)	ARS 26 (INS)	AE RMC (INS)	SMRD (SCV)	Total	ECOFILAE (OP)	Biovallée (OP)
1	Juillet 2023	Validation de la pertinence de l'outil		1	1								1	4	1	2
2	Septembre 2023	Consolidation des données, constitution du cas fictif			1*	1							1*	3		
3	Février 2024	Construction des scénarios	1		1	1(1)	3	2	1	1	1		1*	10	1	2

*Légende : (1) = représenté par un usager ; en vert = personne présente à l'atelier, en gris = personne conviée mais excusée, **en noir** = personne non sollicitée ; * = variation des individus représentant l'entité par rapport à l'atelier précédent ; Agri = agriculteurs ; AE RMC = Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse ; ARS = Agence Région de Santé ; CCVD = Communauté de Communes de Val de Drôme ; INS = acteur institutionnel ; OP = acteur opérationnel ; SATESE = Service d'assistance technique aux exploitants de station d'épuration ; SIID = Syndicat d'Irrigation Drômois ; SMRD = Syndicat Mixte de la Rivière Drôme ; SCV = acteur de la société civile ; 3 CPS = Communauté de Communes du Crestois et du Pays de Saillans ;*

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

Annexe 8 : Structure du questionnaire *ex ante* distribué avant la simulation exploratoire pour les ateliers de la Drôme et de Porquerolles

Partie	Questions	Réponses possibles
Informations	*Nom, Prénom, Organisme et fonction* *Consentement pour l'utilisation des données*	-
Positionnement vis-à-vis de la REUT	*1. Concernant le fait de réutiliser les eaux usées traitées, vous êtes plutôt :*	*Très défavorable – Défavorable – Ni défavorable, ni favorable – Favorable – Très favorable* + Explications
Perception de la REUT comme une pratique à risque	*2. Si je vous dis que la REUT est une pratique pouvant représenter des risques pour la santé humaine et animale, vous êtes plutôt*	*Pas du tout d'accord – Pas d'accord – Ni pas d'accord, ni d'accord – D'accord – Tout à fait d'accord* + Explications
	3. Concernant la REUT pour l'irrigation des cultures citées ci-dessous : carotte, maïs semence, prairie, arboriculture, tomate, salade, pomme de terre, parcs et espaces verts, fourrage, melon, oignon, blé	*Dévaforable – Ni défavorable, ni favorable – Favorable* + Explications
Perception de la qualité + des autres entités	*4. Pourriez-vous évaluer chacun des énoncés suivants :* *- Les processus d'épuration actuels permettent d'assurer une eau de bonne qualité pour l'irrigation* *- Je préfère consommer des produits irrigués avec de l'eau de rivière plutôt qu'avec de l'EUT* *- Il serait préférable que l'eau utilisée pour l'irrigation soit de même qualité que l'eau potable* *- L'encadrement par une réglementation contribue à la gestion des risques pour la REUT* *- Les institutions (Agence Régionale de Santé, Direction Départementale des Territoires, Agence de l'Eau) contribuent à la gestion des risques pour la REUT* *- Les communautés de communes contribuent à la gestion des risques pour la REUT* *- Les agriculteurs contribuent à la gestion des risques pour la REUT* *- La recherche contribue à la gestion des risques pour la REUT* *- Les associations de la société civile (associations de consommateurs, environnementales) contribuent à la gestion des risques pour la REUT*	*Pas du tout d'accord - Pas d'accord - Ni pas d'accord ni d'accord - D'accord - Tout à fait d'accord*
Niveau de connaissances perçu	*5. Pouvez-vous évaluer vos connaissances sur une échelle de 1 à 5 (1 = faibles connaissances à 5 = fortes connaissances) dans les domaines suivants :* *- Fonctionnement d'un projet de REUT* *- Risques sanitaires liés à la REUT* *- Mesures assurant la gestion des risques sanitaires* *- Réglementation encadrant l'utilisation des EUT*	*Notation de 1 à 5*
Eventuels besoins	*6. Souhaitez-vous ajouter quelque chose ?*	*Réponse libre*

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

Annexe 9 : Structure du questionnaire *ex post* distribué après la simulation exploratoire pour les ateliers de la Drôme et de Porquerolles

Partie	Questions	Réponses possibles
Informations	*Nom, Prénom, rôle joué pendant l'atelier*	-
Impression générale	*1. J'aimerais avoir votre impression générale sur les éléments suivants :* *- Atelier de manière générale* *- Durée* *- Cas fictif présenté* *- Votre rôle* *- Les interactions entre les participants*	*Très insatisfaisant – insatisfaisant – Ni insatisfaisant, ni satisfaisant – Satisfaisant – Très satisfaisant* + Suggestions
Avis sur les approches de gestion	*2. Que pensez-vous du scénario de gestion des risques qui a été produit pendant le tour 1 (atteinte de la qualité requise) ?*	*Très insatisfaisant – insatisfaisant – Ni insatisfaisant, ni satisfaisant – Satisfaisant – Très satisfaisant* + Explications
	3. Que pensez-vous du scénario de gestion des risques qui a été produit pendant le tour 2 (atteinte des objectifs liés à la santé) ?	*Très insatisfaisant – insatisfaisant – Ni insatisfaisant, ni satisfaisant – Satisfaisant – Très satisfaisant* + Explications
	4. Concernant les mesures de gestion des risques (ou « barrières », citez les mesures qui vous ont paru peu pertinentes (à gauche) pour gérer les risques sanitaires et celles qui vous ont paru les pertinentes (à droite)	*Réponses libres sous forme de tableau*
Apports grâce à l'outil	*5. Avez-vous appris des choses grâce à l'outil ?*	*Oui – Non* + Explications
Apports grâce aux autres participants	*6. Avez-vous appris des choses grâce aux autres participants*	*Oui – Non* + Explications
Evolution des connaissances	*7. Pouvez-vous évaluer vos connaissances après l'atelier sur une échelle de 1 à 5 (avec 1 = faible connaissance à 5 = forte connaissance) dans les domaines suivants :* *- Fonctionnement d'un projet de REUT* *- Risques sanitaires liés à la REUT* *- Mesures assurant la gestion des risques sanitaires* *- Réglementation encadrant l'utilisation des EUT*	*Notation de 1 à 5*
Avis sur le dispositif	*8. J'aimerais connaitre votre avis sur l'intérêt de ce genre d'atelier :* *- Pensez-vous que ce genre d'atelier contribue à l'organisation collective de la gestion des risques ?* *- Pensez-vous que ce genre d'atelier contribue à l'implication individuelle dans la gestion des risques ?* *- Pensez-vous que ce genre d'atelier renforce la confiance dans la REUT ?*	*Oui – Non* + Explications
Eventuels besoins	*9. Souhaitez-vous ajouter quelque chose ?*	*Réponse libre*

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

Annexe 10 : Résultats obtenus lors de l'identification des populations exposées et de l'attribution des voies d'exposition

Maillon	Populations exposées	Clermont-Ferrand	Drome	Porquerolles
Traitement supplémentaire	Personnel de traitement	Absence d'aérosols	Absence de traitement supplémentaire	Absence de traitement supplémentaire
Maïs semence (aspersion, rampe)	Personnel d'irrigation	Eau	Eau	Eau
	Personnel d'entretien	Plante	Plante	Atteinte d'un temps de dépérissement de 4jours
	Personnel de récolte	Récolte mécanisée	Récolte mécanisée	Récolte mécanisée
	Riverains	Air	Air	Air
	Passants	Air	Air	Air
	Consommateurs	Culture non alimentaire	Culture non alimentaire	Culture non alimentaire
Pomme de terre (aspersion, canon-enrouleur)	Personnel d'irrigation	Eau	Eau	Système d'irrigation automatique
	Personnel d'entretien	Entretien mécanisé	Entretien mécanisé	Entretien mécanisé
	Personnel de récolte	Plante	Sol	Sol
	Riverains	Air	Eau	Eau + Air
	Passants	Air	Eau	Eau
	Consommateurs	Produit	Produit	Cuisson
Carotte (micro-aspersion)	Personnel d'irrigation	Eau	Système d'irrigation automatique	Système d'irrigation automatique
	Personnel d'entretien	Entretien mécanisé	Entretien mécanisé	Entretien mécanisé
	Personnel de récolte	Récolte mécanisée	Récolte mécanisée	Récolte mécanisée
	Riverains	Eau + Air	Micro aspersion	Air
	Passants	Eau + Air	Micro aspersion	Air
	Consommateurs	Produit	Produit	Produit
Oignon (aspersion, canon-enrouleur)	Personnel d'irrigation	[redacted]	Système d'irrigation automatique	Eau + Air
	Personnel d'entretien		Entretien mécanisé	Sol + Plante
	Personnel de récolte		Récolte mécanisée	Sol + Plante
	Riverains		Air	Eau + Air
	Passants		Air	Eau + Air
	Consommateurs		Produit	Produit
Noyer (micro-aspersion sous frondaison)	Personnel d'irrigation		Système d'irrigation automatique	[redacted]
	Personnel d'entretien		Entretien mécanisé	
	Personnel de récolte		Récolte mécanisée	
	Riverains		Micro-aspersion	
	Passants		Eau	
	Consommateurs		Lavage, séchage et pelage	
Pomme	Personnel d'irrigation			Système d'irrigation automatique

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

(micro-aspersion sous frondaison)	Personnel d'entretien			Plante
	Personnel de récolte			Plante
	Riverains			Air
	Passants			Air
	Consommateurs			Produit
Tomate (goutte à goutte de surface)	Personnel d'irrigation	Eau	Système d'irrigation automatique	Eau
	Personnel d'entretien	Goutte à goutte	Goutte à goutte	Goutte à goutte + paillage*
	Personnel de récolte	Sol	Goutte à goutte	Goutte à goutte + paillage*
	Riverains	Goutte à goutte	Goutte à goutte	Goutte à goutte
	Passants	Goutte à goutte	Goutte à goutte	Goutte à goutte
	Consommateurs	Goutte à goutte	Produit	Goutte à goutte + paillage*
Salade (micro-aspersion)	Personnel d'irrigation			Système d'irrigation automatique
	Personnel d'entretien			Plante
	Personnel de récolte			*Absence d'explication*
	Riverains			*Absence d'explication*
	Passants			*Absence d'explication*
	Consommateurs			Produit

*Légende : en gris = justification apportée pour ne pas considérer la population comme exposée ; * = non indiqué par l'outil, définit par les participants*

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

Annexe 11 : Résultats obtenus pour la QMRA réalisée lors de l'atelier de Clermont-Ferrand

					Contribution de la STEP					Contribution du lagunage de maturation					Contribution des mesures post-traitement existantes				
Culture	Population exposée	Voie	Vol (mL)	Freq (j/an)	*Campy*	*Rota*	*Noro Faux*[1]	*Noro Vrai*[2]	*Crypto*	*Campy*	*Rota*	*Noro Faux*	*Noro Vrai*	*Crypto*	*Campy*	*Rota*	*Noro Faux*	*Noro Vrai*	*Crypto*
Maïs semence	P.irrigation	Eau	1	20	5,3E-06	4,7E-05	6,1E-04	7,2E-07	1,2E-05	5,3E-09	1,6E-07	2,1E-06	2,1E-09	1,2E-08	5,3E-09	1,6E-07	2,1E-06	2,1E-09	1,2E-08
	P.entretien	Plante	1	20	5,3E-06	4,7E-05	6,1E-04	7,2E-07	1,2E-05	5,3E-09	1,6E-07	2,1E-06	2,1E-09	1,2E-08	5,3E-13	1,6E-11	2,1E-10	2,1E-13	1,2E-10
	P.récolte	-	-	-															
	Riverains	Air	10	20	5,2E-05	2,8E-04	3,6E-03	7,2E-06		5,3E-08	1,6E-06	2,1E-05	2,1E-08		5,3E-08	1,6E-06	2,1E-05	2,1E-08	
	Passants	Air	20	20	1,0E-04	3,6E-04	4,6E-03	1,4E-05		1,1E-07	3,1E-06	4,1E-05	4,1E-08		1,1E-07	3,1E-06	4,1E-05	4,1E-08	
	Consommateurs	-	-	-															
Pomme de terre	P.irrigation	Eau	1	20	5,3E-06	4,7E-05	6,1E-04	7,2E-07	1,2E-05	5,3E-09	1,6E-07	2,1E-06	2,1E-09	1,2E-08	5,3E-09	1,6E-07	2,1E-06	2,1E-09	1,2E-08
	P.entretien	-	-	-															
	P.récolte	Plante	1	20	5,3E-06	4,7E-05	6,1E-04	7,2E-07	1,2E-05	5,3E-09	1,6E-07	2,1E-06	2,1E-09	1,2E-08	5,3E-09	1,6E-07	2,1E-06	2,1E-09	1,2E-08
	Riverains	Air	10	20	5,2E-05	2,8E-04	3,6E-03	7,2E-06		5,3E-08	1,6E-06	2,1E-05	2,1E-08		5,3E-08	1,6E-06	2,1E-05	2,1E-08	
	Passants	Air	20	20	1,0E-04	3,6E-04	4,6E-03	1,4E-05		1,1E-07	3,1E-06	4,1E-05	4,1E-08		1,1E-07	3,1E-06	4,1E-05	4,1E-08	
	Consommateurs	Produit	2,5	185,2	1,2E-04	3,9E-04	4,7E-03	1,7E-05	2,5E-04	1,2E-07	3,6E-06	4,7E-05	4,8E-08	2,9E-07	1,2E-12	3,7E-11	4,8E-10	4,8E-13	2,9E-12
Carotte	P.irrigation	Eau	1	20	5,3E-06	4,7E-05	6,1E-04	7,2E-07	1,2E-06	5,3E-09	1,6E-07	2,1E-06	2,1E-09	3,9E-09	5,3E-09	1,6E-07	2,1E-06	2,1E-09	3,9E-09
	P.entretien	-	-	-															
	P.récolte	-	-	-															
	Riverains	Eau	1	20	5,3E-06	4,7E-05	6,1E-04	7,2E-07	1,2E-05	5,3E-09	1,6E-07	2,1E-06	2,1E-09	1,2E-08	5,3E-10	1,6E-08	2,1E-07	2,1E-10	1,2E-09
	Riverains	Air	10	20	5,2E-05	2,8E-04	3,6E-03	7,2E-06		5,3E-08	1,6E-06	2,1E-05	2,1E-08		5,3E-09	1,6E-07	2,1E-06	2,1E-09	
	Passants	Eau	1	20	5,3E-06	4,7E-05	6,1E-04	7,2E-07	1,2E-05	5,3E-09	1,6E-07	2,1E-06	2,1E-09	1,2E-08	5,3E-08	1,6E-08	2,1E-07	2,1E-10	1,2E-09
	Passants	Air	20	20	1,0E-04	3,6E-04	4,6E-03	1,4E-05		1,1E-07	3,1E-06	4,1E-05	4,1E-08		1,6E-08	3,2E-07	4,1E-06	4,1E-09	
	Consommateurs	Produit	2	185,2	1,2E-04	3,9E-04	4,7E-03	1,7E-05	2,5E-04	1,2E-07	3,6E-06	4,7E-05	4,8E-08	2,9E-07	5,3E-08	3,7E-08	4,8E-07	4,8E-10	2,9E-09
Tomate	P.irrigation	Eau	1	20	5,3E-06	4,7E-05	6,1E-04	7,2E-07	1,2E-05	5,3E-09	1,6E-07	2,1E-06	2,1E-09	1,2E-08	5,3E-09	1,6E-07	2,1E-06	2,1E-09	1,2E-08
	P.entretien	-	-	-															
	P.récolte	Sol	0,01	20	5,3E-06	4,7E-05	6,1E-04	7,2E-07	1,2E-05	5,3E-09	1,6E-07	2,1E-06	2,1E-09	1,2E-08	5,3E-11	1,6E-09	2,1E-08	2,1E-11	1,2E-10
	Riverains	-	-	-															
	Passants	-	-	-															
	Consommateurs	-	-	-															

Légende : Freq = Fréquence ; Noro faux = résultats pour norovirus obtenus avec une erreur dans le modèle dose réponse (P=1,106) ; Noro vrai = modèle dose réponse corrigé (P=1106) ; Vol = volume

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

Annexe 12 : Résultats obtenus pour la QMRA réalisée lors de l'atelier de la Drôme

					Contribution de la STEP					Contribution des mesures post-traitement existantes					Contribution des nouvelles mesures post traitement				
Culture	Pop. expo	Voie	Vol (mL)	Freq (j/an)	*Campy*	*Rota*	*Noro Faux*	*Noro Vrai*	*Crypto*	*Campy*	*Rota*	*Noro Faux*	*Noro Vrai*	*Crypto*	*Campy*	*Rota*	*Noro Faux*	*Noro Vrai*	*Crypto*
Maïs semence	P.irr	Eau	1	20	5,3E-06	4,7E-05	5,1E-04	5,4E-07	1,2E-05	5,3E-06	4,7E-05	5,1E-04	5,4E-07	1,2E-05	5,3E-06	4,7E-05	5,1E-04	5,4E-07	1,2E-05
	P.ent	Plante	1	10	2,6E-06	2,4E-05	2,6E-04	2,7E-07	5,9E-06	2,6E-10	2,5E-07	2,7E-06	2,7E-09	5,9E-08	2,6E-10	2,5E-07	2,7E-06	2,7E-09	5,9E-08
	P.rec	-	-	-															
	Riv	Air	1,74	20	9,1E-06	7,7E-05	8,5E-04	9,5E-07		9,1E-06	7,7E-05	8,5E-04	9,5E-07		9,1E-06	7,7E-05	8,5E-04	9,5E-07	
	Pass	Air	3,4	20	1,8E-05	1,4E-04	1,5E-03	1,9E-06		1,8E-05	1,4E-04	1,5E-03	1,9E-06		1,8E-05	1,4E-04	1,5E-03	1,9E-06	
	Conso	-	-	-															
Pomme de terre	P.irr	Eau	1	40	1,0E-05	8,8E-05	9,6E-04	1,1E-06	2,3E-05	1,0E-05	8,8E-05	9,6E-04	1,1E-06	2,3E-05	1,0E-05	8,8E-05	9,6E-04	1,1E-06	2,3E-05
	P.ent	-	-	-															
	P.rec	Sol	0,1	7	1,8E-07	1,7E-06	1,9E-05	1,9E-08	4,1E-07	1,8E-07	1,7E-06	1,9E-05	1,9E-08	4,1E-07	1,8E-08	1,7E-07	1,9E-06	1,9E-09	4,1E-08
	Riv	Air	0,8	20	4,2E-06	3,8E-05	4,1E-04	4,4E-07		4,2E-06	3,8E-05	4,1E-04	4,4E-07		4,2E-07	4,0E-06	4,3E-05	4,4E-08	
	Pass	Air	1,6	20	8,4E-06	7,1E-05	7,9E-04	8,7E-07		8,4E-06	7,1E-05	7,9E-04	8,7E-07		8,4E-07	7,9E-06	8,6E-05	8,7E-08	
	Conso	Produit	12	48	1,4E-04	4,0E-04	4,1E-03	1,6E-05	2,9E-04	1,5E-09	1,4E-08	1,6E-07	1,6E-10	3,4E-09	1,5E-10	1,4E-09	1,6E-08	1,6E-11	3,4E-10
Carotte	P.irr	-	-	-															
	P.ent	-	-	-															
	P.rec	-	-	-															
	Riv	-	-	-															
	Pass	-	-	-															
	Conso	Produit	6	48	7,4E-05	3,4E-04	3,5E-03	7,8E-06	1,6E-04	0,0E+00	2,3E-11	2,5E-10	2,5E-13	5,4E-12	0,0E+00	2,3E-11	2,5E-10	2,5E-13	5,4E-12
Oignon	P.irr	-	-	-															
	P.ent	-	-	-															
	P.rec	-	-	-															
	Riv	Air	0,8	20	4,2E-06	3,8E-05	4,1E-04	4,4E-07		4,2E-06	3,8E-05	4,1E-04	4,4E-07		4,2E-07	4,0E-06	4,3E-05	4,4E-08	
	Pass	Air	1,6	20	8,4E-06	7,1E-05	7,9E-04	8,7E-07		8,4E-06	7,1E-05	7,9E-04	8,7E-07		8,4E-07	7,9E-06	8,6E-05	8,7E-08	
	Conso	Produit	6	96	1,4E-04	4,0E-04	4,1E-03	1,6E-05	2,9E-04	1,5E-08	1,4E-07	1,6E-06	1,6E-05	3,4E-08	1,5E-09	1,4E-08	1,6E-07	1,6E-10	3,4E-09
Noix	P.irr	-	-	-															
	P.ent	-	-	-															

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

	P.rec	-	-	-															
	Riv	-	-	-															
	Pass	Eau	0,8	20	4,2E-06	3,8E-05	4,1E-04	4,4E-07	9,4E-06	4,2E-07	4,0E-06	4,3E-05	4,4E-08	9,4E-07	4,2E-07	4,0E-06	4,3E-05	4,4E-08	9,4E-07
	Conso	-	-	-															
Tomate	P.irr	-	-	-															
	P.ent	-	-	-															
	P.rec	-	-	-															
	Riv	-	-	-															
	Pass	-	-	-															
	Conso	Produit	0,72	60	1,1E-05	9,4E-05	1,0E-03	1,2E-06	2,5E-05	1,1E-09	1,1E-08	1,2E-07	1,2E-10	2,5E-09	1,1E-09	1,1E-08	1,2E-07	1,2E-10	2,5E-09

Légende : Conso = consommateurs ; Freq = Fréquence ; P.irr = personnel d'irrigation ; P.ent = personnel d'entretien ; P.rec = personnel de récolte ; Noro faux = résultats pour norovirus obtenus avec une erreur dans le modèle dose réponse (P=1,106) ; Noro vrai = modèle dose réponse corrigé (P=1106) ; Riv = riverains ; Pass = passants ; Vol = volume ;

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

Annexe 13 : Résultats obtenus pour la QMRA réalisée lors de l'atelier de Porquerolles

					Contribution de la STEP					Contribution des mesures post-traitement existantes					Contribution des nouvelles mesures post traitement				
Culture	Pop. expo	Voie	Vol (mL)	Freq (j/an)	*Campy*	*Rota*	*Noro Faux*	*Noro Vrai*	*Crypto*	*Campy*	*Rota*	*Noro Faux*	*Noro Vrai*	*Crypto*	*Campy*	*Rota*	*Noro Faux*	*Noro Vrai*	*Crypto*
Maïs semence	P.irr	Eau	1	20	5,3E-06	4,7E-05	5,1E-04	5,4E-07	1,2E-05	5,3E-06	4,7E-05	5,1E-04	5,4E-07	1,2E-05	5,3E-06	4,7E-05	5,1E-04	5,4E-07	1,2E-05
	P.ent	-	-	-															
	P.rec	-	-	-															
	Riv	Air	1,74	20	9,1E-06	7,7E-05	8,5E-04	9,5E-07		9,1E-06	7,7E-05	8,5E-04	9,5E-07		9,1E-06	7,7E-05	8,5E-04	9,5E-07	
	Pass	Air	3,4	20	1,8E-05	1,4E-04	1,5E-03	1,9E-06		1,8E-05	1,4E-04	1,5E-03	1,9E-06		1,8E-05	1,4E-04	1,5E-03	1,9E-06	
	Conso	-	-	-															
Pomme de terre	P.irr	-	-	-															
	P.ent	-	-	-															
	P.rec	Sol	0,1	7	1,8E-07	1,7E-06	1,9E-05	1,9E-08	4,1E-07	1,8E-07	1,7E-06	1,9E-05	1,9E-08	4,1E-07	1,8E-07	1,7E-06	1,9E-05	1,9E-08	4,1E-07
	Riv	Eau	0,8	20	4,2E-06	3,8E-05	4,1E-04	4,4E-07	9,4E-06	4,2E-06	3,8E-05	4,1E-04	4,4E-07	9,4E-06	4,2E-06	3,8E-05	4,1E-04	4,4E-07	9,4E-06
	Riv	Air	0,8	20	4,2E-06	3,8E-05	4,1E-04	4,4E-07		4,2E-06	3,8E-05	4,1E-04	4,4E-07		4,2E-06	3,8E-05	4,1E-04	4,4E-07	
	Pass	Eau	1,6	20	8,4E-06	7,1E-05	7,9E-04	8,7E-07	1,9E-05	8,4E-06	7,1E-05	7,9E-04	8,7E-07	1,9E-05	8,4E-06	7,1E-05	7,9E-04	8,7E-07	1,9E-05
	Conso	-	-	-															
Carotte	P.irr	-	-	-															
	P.ent	-	-	-															
	P.rec	-	-	-															
	Riv	Air	0,4	20	2,1E-06	1,9E-05	2,1E-04	2,2E-07		2,1E-07	2,0E-06	2,2E-05	2,2E-08		2,1E-07	2,0E-06	2,2E-05	2,2E-08	
	Pass	Air	0,8	20	4,2E-06	3,8E-05	4,1E-04	4,4E-07		4,2E-07	4,0E-06	4,3E-05	4,4E-08		4,2E-07	4,0E-06	4,3E-05	4,4E-08	
	Conso	Produit	4,5	48	5,6E-05	3,0E-04	3,1E-03	5,9E-06	1,2E-04	5,7E-13	1,7E-08	1,9E-07	1,9E-10	4,0E-09		1,7E-12	1,9E-11	1,9E-14	4,0E-13
Oignon	P.irr	Eau	1	40	1,0E-05	8,8E-05	9,6E-04	1,1E-06	2,3E-05	1,0E-05	8,8E-05	9,6E-04	1,1E-06	2,3E-05	1,0E-05	8,8E-05	9,6E-04	1,1E-06	2,3E-05
	P.irr	Air	1	40	1,0E-05	8,8E-05	9,6E-04	1,1E-06		1,0E-05	8,8E-05	9,6E-04	1,1E-06		1,0E-05	8,8E-05	9,6E-04	1,1E-06	
	P.ent	Sol	0,1	36	9,5E-07	8,9E-06	9,7E-05	9,8E-08	2,1E-06	9,5E-07	8,9E-06	9,7E-05	9,8E-08	2,1E-06	9,5E-08	9,0E-07	9,8E-06	9,8E-09	2,1E-07
	P.ent	Plante	1	48	1,3E-05	1,0E-04	1,1E-03	1,3E-06	2,8E-05	1,3E-05	1,0E-04	1,1E-03	1,3E-06	2,8E-05	1,3E-06	1,2E-05	1,3E-04	1,3E-07	2,8E-06
	P.rec	Sol	0,1	12	3,2E-07	3,0E-06	3,3E-05	3,3E-08	7,1E-07	3,2E-07	3,0E-06	3,3E-05	3,3E-08	7,1E-07	3,2E-08	3,0E-07	3,3E-06	3,3E-09	7,1E-08
	P.rec	Plante	1	12	3,2E-06	2,9E-05	3,1E-04	3,3E-07	7,0E-06	3,2E-06	2,9E-05	3,1E-04	3,3E-07	7,0E-06	3,2E-07	3,0E-06	3,3E-05	3,3E-08	7,1E-07
	Riv	Eau	0,8	20	4,2E-06	3,8E-05	4,1E-04	4,4E-07	9,4E-06	4,2E-06	3,8E-05	4,1E-04	4,4E-07	9,4E-06	4,2E-07	4,0E-06	4,3E-05	4,4E-08	9,4E-07

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

	Riv	Air	0,8	20	4,2E-06	3,8E-05	4,1E-04	4,4E-07		4,2E-06	3,8E-05	4,1E-04	4,4E-07		4,2E-07	4,0E-06	4,3E-05	4,4E-08	
	Pass	Eau	1,6	20	8,4E-06	7,1E-05	7,9E-04	8,7E-07	1,9E-05	8,4E-06	7,1E-05	7,9E-04	8,7E-07	1,9E-05	8,4E-07	7,9E-06	8,6E-05	8,7E-08	1,9E-06
	Pass	Air	1,6	20	8,4E-06	7,1E-05	7,9E-04	8,7E-07		8,4E-06	7,1E-05	7,9E-04	8,7E-07		8,4E-07	7,9E-06	8,6E-05	8,7E-08	
	Conso	Produit	6	96	1,4E-04	4,0E-04	4,1E-03	1,6E-05	2,9E-04	1,5E-08	1,4E-07	1,6E-06	1,6E-09	3,4E-08	1,5E-09	1,4E-08	1,6E-07	1,6E-10	3,4E-09
Pomme	P.irr	-	-	-															
	P.ent	Plante	1	48	1,3E-05	1,0E-04	1,1E-03	1,3E-06	2,8E-05	1,3E-09	1,2E-08	1,3E-07	1,3E-10	2,8E-09	1,3E-09	1,2E-08	1,3E-07	1,3E-10	2,8E-09
	P.rec	Plante	1	12	3,2E-06	2,9E-05	3,1E-04	3,3E-07	7,0E-06	3,2E-10	3,0E-09	3,3E-08	3,3E-11	7,1E-10	3,2E-10	3,0E-09	3,3E-08	3,3E-11	7,1E-10
	Riv	Air	0,4	20	2,1E-06	1,9E-05	2,1E-04	2,2E-07		2,1E-07	2,0E-06	2,2E-05	2,2E-08		2,1E-07	2,0E-06	2,2E-05	2,2E-08	
	Pass	Air	0,8	20	4,2E-06	3,8E-05	4,1E-04	4,4E-07		4,2E-07	4,0E-06	4,3E-05	4,4E-08		4,2E-07	4,0E-06	4,3E-05	4,4E-08	
	Conso	Produit	3,75	96	9,2E-05	3,7E-04	3,8E-03	9,8E-06	1,9E-04	9,5E-09	9,0E-08	9,8E-07	9,8E-10	2,1E-08	9,5E-09	9,0E-08	9,8E-07	9,8E-10	2,1E-08
Tomate	P.irr	Eau	1	20	5,3E-06	4,7E-05	5,1E-04	5,4E-07	1,2E-05	5,3E-06	4,7E-05	5,1E-04	5,4E-07	1,2E-05	5,3E-06	4,7E-05	5,1E-04	5,4E-07	1,2E-05
	P.ent	-	-	-															
	P.rec	-	-	-															
	Riv	-	-	-															
	Pass	-	-	-															
	Conso	-	-	-															
Salade	P.irr	-	-	-															
	P.ent	Plante	1	48	1,3E-05	1,0E-04	1,1E-03	1,3E-06	2,8E-05	1,3E-06	1,2E-05	1,3E-04	1,3E-07	2,8E-06	1,3E-07	1,2E-06	1,3E-05	1,3E-08	2,8E-07
	P.rec	-	-	-															
	Riv	-	-	-															
	Pass	-	-	-															
	Conso	Produit	15	48	1,8E-04	4,1E-04	4,1E-03	2,0E-05	3,5E-04	1,9E-06	1,8E-05	1,9E-04	2,0E-07	4,2E-06	1,9E-07	1,8E-06	2,0E-05	2,0E-08	4,2E-07

Légende : Conso = consommateurs ; Freq = Fréquence ; P.irr = personnel d'irrigation ; P.ent = personnel d'entretien ; P.rec = personnel de récolte ; Noro faux = résultats pour norovirus obtenus avec une erreur dans le modèle dose réponse (P=1,106) ; Noro vrai = modèle dose réponse corrigé (P=1106) ; Riv = riverains ; Pass = passants ; Vol = volume ;

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

Références

Abdelhedi, S., 2021. Réutilisation des eaux usées traitées : Approche par barrières multiples. [Mémoire de stage M2]. Faculté des sciences et technologies. Université de Lille.

Adegoke, A.A., Amoah, I.D., Stenström, T.A., Verbyla, M.E., Mihelcic, J.R., 2018. Epidemiological Evidence and Health Risks Associated With Agricultural Reuse of Partially Treated and Untreated Wastewater: A Review. Front. Public Health 6. https://doi.org/10.3389/fpubh.2018.00337

Aemig, Q., Hélias, A., Patureau, D., 2021. Impact assessment of a large panel of organic and inorganic micropollutants released by wastewater treatment plants at the scale of France. Water Research 188, 116524. https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116524

Alcalde-Sanz, L., Gawlik, B.M., 2017. Minimum quality requirements for water reuse in agricultural irrigation and aquifer recharge : Towards a water reuse regulatory instrument at EU level, JRC Science for Policy Report. 64p. https://doi.org/10.2760/804116

Alix, A., Bellet, L., Trommsdorff, C., Audureau, I. 2022. *Réduire les émissions de gaz à effet de serre des services d'eau et d'assainissement: Aperçu des émissions et de leur potentiel de réduction illustré par le savoir-faire des services d'eau*. IWA Publishing. 60p.https://doi.org/10.2166/9781789063271

Allende, A., Castro-Ibáñez, I., Lindqvist, R., Gil, M.I., Uyttendaele, M., Jacxsens, L., 2017. Quantitative contamination assessment of Escherichia coli in baby spinach primary production in Spain: Effects of weather conditions and agricultural practices. International Journal of Food Microbiology 257, 238–246. https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2017.06.027

Allende, A., Truchado, P., Lindqvist, R., Jacxsens, L., 2018. Quantitative microbial exposure modelling as a tool to evaluate the impact of contamination level of surface irrigation water and seasonality on fecal hygiene indicator E. coli in leafy green production. Food Microbiology, New Tools to Detect and Prevent Foodborne Outbreaks from Farm to Fork 75, 82–89. https://doi.org/10.1016/j.fm.2018.01.016

Amha, Y., Kumaraswamy, R., Ahmad, F., 2015. A probabilistic QMRA of Salmonella in direct agricultural reuse of treated municipal wastewater. Water Science & Technology 71, 1203–1211. https://doi.org/10.2166/wst.2015.093

Amoah, P., Drechsel, P., Abaidoo, R.C., Klutse, A., 2007. Effectiveness of common and improved sanitary washing methods in selected cities of West Africa for the reduction of coliform bacteria and helminth eggs on vegetables. Tropical Medicine & International Health 12, 40–50. https://doi.org/10.1111/j.1365-3156.2007.01940.x

Amoah, P., Keraita, B., Akple, M., Drechsel, P., Abaidoo, R.C., Konradsen, F., 2011. Low-cost options for reducing consumer health risks from farm to fork where crops are irrigated with polluted water in West Africa (No. 141), IWMI Research Report. International Water Management Institute, Sri Lanka. https://doi.org/10.5337/2011.201

Angelakis, A.N., Asano, T., Bahri, A., Jimenez, B.E., Tchobanoglous, G., 2018. Water Reuse: From Ancient to Modern Times and the Future. Front. Environ. Sci. 6, 17. https://doi.org/10.3389/fenvs.2018.00026

Anses, 2012a. Réutilisation des eaux usées traitées pour l'irrigation des cultures, l'arrosage des espaces verts par aspersion et le lavage des voiries (Rapport d'expertise collective No. 2009- SA- 0329). Agence Nationale de Sécurité Sanitaire Alimentation, Environnement, Travail, Maisons-Alfort.

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

Anses, 2012b. *Fiche de description de danger biologique transmissible par les aliments : « Rotavirus ».* Fiches de danger biologiques transmissibles par les aliments. Agence Nationale de Sécurité Sanitaire Alimentation, Environnement, Travail. Saisine N°"2012-SA-0031". https://www.anses.fr/fr/content/fiches-de-dangers-biologiques-transmissibles-par-les-aliments?titre=rotavirus

Anses, 2017. Étude individuelle nationale des consommations alimentaires 3 (INCA 3), Avis de l'Anses. Rapport d'expertise collective. Agence Nationale de Sécurité Sanitaire Alimentation, Environnement, Travail, Maisons-Alfort.

Anses, 2020. Méthodologie de hiérarchisation des dangers biologiques et chimiques dans les aliments (Saisine No. 2016- SA- 0153). Agence Nationale de Sécurité Sanitaire Alimentation, Environnement, Travail, Maisons-Alfort.

Anses, 2021a. *La sécurité sanitaire des aliments, de la fourche à la fourchette.* Agence Nationale de Sécurité Sanitaire Alimentation, Environnement, Travail. 06/04/2021. [En ligne]. https://www.anses.fr/fr/content/la-securite-sanitaire-des-aliments-fourche-fourchette

Anses, 2021b. *Fiche de description de danger biologique transmissible par les aliments : « Campylobacter ».* Fiches de danger biologiques transmissibles par les aliments. Agence Nationale de Sécurité Sanitaire Alimentation, Environnement, Travail. Saisine N°"2016-SA-0079". https://www.anses.fr/fr/content/fiches-de-dangers-biologiques-transmissibles-par-les-aliments?titre=campy

Anses, 2023. Avis de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail relatif au « projet d'arrêté relatif aux conditions de production et d'utilisation des eaux usées traitées [issues du traitement d'épuration des eaux résiduaires urbaines] pour l'irrigation de cultures ou d'espaces verts ». Agence Nationale de Sécurité Sanitaire Alimentation, Environnement, Travail. Saisine N°"2022-SA-0238". Maisons-Alfort. 84p.

Antwi-Agyei, P., Biran, A., Peasey, A., Bruce, J., Ensink, J., 2016. A faecal exposure assessment of farm workers in Accra, Ghana: a cross sectional study. BMC Public Health 16, 587. https://doi.org/10.1186/s12889-016-3266-8

Arnstein, S.R., 1969. A ladder of citizen participation. Journal Of American Institute of Planners. 216-224. https://doi.org/10.1080/01944366908977225

ARPE, 2017. Comment réussir son projet de réutilisation des eaux usées traitées. Agence régionale pour l'environnement PACA.16p. https://www.actu-environnement.com/media/pdf/news-30744-reut-guide.pdf

Asano, T., Leong, L.Y.C., Rigby, M.G., Sakaji, R.H., 1992. Evaluation of the California Wastewater Reclamation Criteria Using Enteric Virus Monitoring Data. Water Sci Technol 26, 1513–1524. https://doi.org/10.2166/wst.1992.0595

Association ComMod, 2013. *La modélisation d'accompagnement : fondements et éthique d'une démarche de concertation pour un développement durable*.

ASTEE, 2023. Favoriser le recours aux eaux non conventionnelles - Analyse des freins et leviers et recommandations du Groupe de Travail Astee. Groupe de travail Eaux non conventionnelles de l'ASTEE. 24p.

Baggett, S., Jeffrey, P., Jefferson, B., 2006. Risk perception in participatory planning for water reuse. Desalination 187, 149–158. https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.04.075

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

Banach, J.L., Van Der Fels-Klerx, H.J., 2020. Microbiological Reduction Strategies of Irrigation Water for Fresh Produce. Journal of Food Protection 83, 1072–1087. https://doi.org/10.4315/JFP-19-466

Barnaud, C., 2008. Equité, jeux de pouvoir et légitimité: les dilemmes d'une gestion concertée des ressources renouvelables. Mise à l'épreuve d'une posture d'accompagnement critique dans deux systèmes agraires des hautes terres du Nord de la Thaïlande. [Thèse de doctorat]. Paris X Nanterre. 407p.

Basco-Carrera, L., Warren, A., van Beek, E., Jonoski, A., Giardino, A., 2017. Collaborative modelling or participatory modelling? A framework for water resources management. Environmental Modelling & Software 91, 95–110. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.01.014

Beaudequin, D., Harden, F., Roiko, A., Stratton, H., Lemckert, C., Mengersen, K., 2015. Beyond QMRA: Modelling microbial health risk as a complex system using Bayesian networks. Environment International 80, 8–18. https://doi.org/10.1016/j.envint.2015.03.013

Beaupoil, A., Le Borgne, C., Mucig, C., Roux, A., 2010. Risques sanitaires liés à la réutilisation d'eaux usées traitées pour l'aéroaspersion des espaces verts. EHESP. 63p.

Becu, N., 2020. Les courants d'influence et la pratique de la simulation participative : Contours, design et contributions aux changements sociétaux et organisationnels dans les territoires. [Habilitation à Diriger des Recherches]. Université de la Rochelle. 268p.

Belias, A.M., Sbodio, A., Truchado, P., Weller, D., Pinzon, J., Skots, M., Allende, A., Munther, D., Suslow, T., Wiedmann, M., Ivanek, R., 2020. Effect of Weather on the Die-Off of Escherichia coli and Attenuated Salmonella enterica Serovar Typhimurium on Preharvest Leafy Greens following Irrigation with Contaminated Water. Appl Environ Microbiol 86, e00899-20. https://doi.org/10.1128/AEM.00899-20

Berry, A., Becu, N., Goubier, O., Papoulias, N., Long, N., Vye, D., 2020. De la simulation à la simulation participative : apporter une vision intégrée de la rénovation urbaine aux aménageurs publics, à travers une démarche expérimentale. Netcom. Réseaux, communication et territoires. https://doi.org/10.4000/netcom.5600

Beuchat, L.R., 1998. Surface decontamination of fruits and vegetables eaten raw : a review. World Health Organisation (Report N° WHO/FSF/FOS/98.2).Geneva. pp.52.

Bichai, F., Smeets, P.W.M.H., 2013. Using QMRA-based regulation as a water quality management tool in the water security challenge: Experience from the Netherlands and Australia. Water Research 47, 7315–7326. https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.09.062

Bourdoux, S., Li, D., Rajkovic, A., Devlieghere, F., Uyttendaele, M., 2016. Performance of Drying Technologies to Ensure Microbial Safety of Dried Fruits and Vegetables. Compr Rev Food Sci Food Saf 15, 1056–1066. https://doi.org/10.1111/1541-4337.12224

Bozkurt, H., Bell, T., van Ogtrop, F., Phan-Thien, K.-Y., McConchie, R., 2021. Assessment of microbial risk during Australian industrial practices for Escherichia coli O157:H7 in fresh cut-cos lettuce: A stochastic quantitative approach. Food Microbiology 95, 12. https://doi.org/10.1016/j.fm.2020.103691

Brackett, R.E., 1987. Antimicrobial Effect of Chlorine on Listeria monocytogenes. Journal of Food Protection 50, 999–1004. https://doi.org/10.4315/0362-028X-50.12.999

Busgang, A., Friedler, E., Gilboa, Y., Gross, A., 2018. Quantitative Microbial Risk Analysis for Various Bacterial Exposure Scenarios Involving Greywater Reuse for Irrigation. Water 10. https://doi.org/10.3390/w10040413

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

Capra, A., Scicolone, B., 2007. Recycling of poor quality urban wastewater by drip irrigation systems. Journal of Cleaner Production, Water Management in Coastal Zones and Deltas 15, 1529–1534. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2006.07.032

Carré, E., 2017. Qualité biologique des eaux usées traitées en vue de la réutilisation. Thèse de doctorat. Université de Lyon, Ecole des Mines de Saint-Etienne. 359p.

Carré, E., Beigbeder, J., Jauzein, V., Junqua, G., Lopez-Ferber, M., 2017. Life cycle assessment case study: Tertiary treatment process options for wastewater reuse. Integrated Environmental Assessment and Management 13, 1113–1121. https://doi.org/10.1002/ieam.1956

Cartuyvels, Y., 2008. Introduction : L'ambivalence du risque, entre pratiques et représentations, valeur et menace, in: Les ambivalences du risque : Regards croisés en sciences sociales, Travaux et recherches. Presses universitaires Saint-Louis Bruxelles, Bruxelles, pp. 7–25. https://doi.org/10.4000/books.pusl.3471

CDDAT, 2020. Rapport d'information déposé en application de l'article 145 du Règlement par la Mission d'Information sur la gestion des conflits d'usage en situation de pénurie d'eau.

Cerema, 2020. Réutilisation des eaux usées traitées : le panorama français. Collection connaissances, Cerema, 46p.

Cerema, en cours de publication. *Economie et partage des ressources en eau. Séries de fiches : Fiche technique n°7 : Pérenniser l'irrigation agricole par les eaux usées : L'adaptation réussie de Clermont-Ferrand*. Cerema éditions.

Cerema, en cours de publication. *Economie et partage des ressources en eau. Séries de fiches : Fiche technique n°9 : Utiliser les eaux usées traitées en contexte insulaire : L'exemple précurseur de Porquerolles*. Cerema éditions.

Cesbron, 2023. Pourquoi la métropole de Clermont-Ferrand va participer au rachat des lagunes de l'ancienne sucrerie Bourdon. La Montagne. Publié le 29/09/2023. https://www.lamontagne.fr/clermont-ferrand-63000/actualites/pourquoi-la-metropole-de-clermont-ferrand-va-participer-au-rachat-des-lagunes-de-l-ancienne-sucrerie-bourdon_14379212/

Chauvin, B., 2014. La perception des risques: Apports de la psychologie à l'identification des déterminants du risque perçu. De Boeck Superieur. 215p.

Chhipi-Shrestha, G., Rodriguez, M., Sadiq, R., 2019. Selection of sustainable municipal water reuse applications by multi-stakeholders using game theory. Science of The Total Environment 650, 2512–2526. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.359

CIEAU. 2025. Baromètre Kantar/CIEAU : « Les Français et l'eau » 28ème édition. Centre d'information sur l'eau. 11/02/2025. [En ligne]. https://www.cieau.com/barometre-kantar-cieau-les-francais-et-leau-28eme-edition/

Courault, D., Albert, I., Perelle, S., Fraisse, A., Renault, P., Salemkour, A., Amato, P., 2017. Assessment and risk modeling of airborne enteric viruses emitted from wastewater reused for irrigation. Science of The Total Environment 592, 512–526. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.105

Criquet, 2020. Chloration de l'eau : entre désinfection et sous-produits, l'art subtil du compromis. Publié le 29/03/2020. The Conversation. https://theconversation.com/chloration-de-leau-entre-desinfection-et-sous-produits-toxiques-lart-subtil-du-compromis-133260

Crookall, D., 2010. Serious Games, Debriefing, and Simulation/Gaming as a Discipline. Simulation & Gaming 41, 898–920. https://doi.org/10.1177/1046878110390784

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

Damaceno, M.G. de S., Cruvinel, K.A. da S., Santos, A.S.P., 2022. Semiquantitative microbiological risk assessment for water reuse in agriculture: a case study in Brazil. Water Supply 22, 7375–7386. https://doi.org/10.2166/ws.2022.285

de Boer, S., González-Rodríguez, J., Conde, J.J., Moreira, M.T., 2022. Benchmarking tertiary water treatments for the removal of micropollutants and pathogens based on operational and sustainability criteria. Journal of Water Process Engineering 46. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.102587

De Kervasdoué, C. 2023. Boire nos eaux usées traitées, on y vient ! Le Reportage de la Rédaction, France Culture. Publié le 06/05/2023. [En ligne]. https://www.radiofrance.fr/franceculture/podcasts/le-reportage-de-la-redaction/boire-nos-eaux-usees-traitees-on-y-vient-8671821

De Keuckelaere, A., Jacxsens, L., Amoah, P., Medema, G., McClure, P., Jaykus, L.-A., Uyttendaele, M., 2015. Zero Risk Does Not Exist: Lessons Learned from Microbial Risk Assessment Related to Use of Water and Safety of Fresh Produce: Water quality in fresh produce. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 14, 387–410. https://doi.org/10.1111/1541-4337.12140

Declercq, R., Loubier, S., Condom, N., Molle, B., 2020. Socio-Economic Interest of Treated Wastewater Reuse in Agricultural Irrigation and Indirect Potable Water Reuse: Clermont-Ferrand and Cannes Case Studies' Cost–Benefit Analysis. Irrigation and Drainage 69, 194–208. https://doi.org/10.1002/ird.2205

Demortain, D., 2019. Une société (de l'analyse) du risque ? Natures Sciences Sociétés. 27, 390–398. https://doi.org/10.1051/nss/2020005

Devaux, I., Gerbaud, L., Planchon, C., Bontoux, J., Glanddier, Ph.Y., 2001. Infectious risk associated with wastewater reuse: an epidemiological approach applied to the case of Clermont-Ferrand, France. Water Science and Technology 43, 53–60. https://doi.org/10.2166/wst.2001.0711

Dickin, S.K., Schuster-Wallace, C.J., Qadir, M., Pizzacalla, K., 2016. A review of health risks and pathways for exposure to wastewater Use in Agriculture. Environmental health perspectives 124, 900–909. https://doi.org/10.1289/ehp.1509995

Dingemans, M., Smeets, P., Medema, G., Frijns, J., Raat, K., Wezel, A., Bartholomeus, R., 2020. Responsible Water Reuse Needs an Interdisciplinary Approach to Balance Risks and Benefits. Water 12, 1264. https://doi.org/10.3390/w12051264

do Monte, M.H.F.M., 2007. Guidelines for Good Practice of Water Reuse for Irrigation: Portuguese Standard NP 4434, in: Zaidi, M.K. (Ed.), Wastewater Reuse–Risk Assessment, Decision-Making and Environmental Security. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 253–265. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6027-4_25

Drechsel, P., Marjani Zadeh, S., Pedrero, F., 2023. Water quality in agriculture: Risks and risk mitigation. FAO & IWMI, Rome. pp.192.https://doi.org/10.4060/cc7340en

Drechsel, P., Scott, A.C., Raschid-Sally, L., Redwood, M., Bahri, A., 2011. L'irrigation avec des eaux usées et la santé : évaluer et atténuer les risques dans les pays à faible revenu. Presses de l'Université du Québec, Québec. 479p.

Drechsel, P., Qadir, M., Galibourg, D., 2022. The WHO Guidelines for Safe Wastewater Use in Agriculture: A Review of Implementation Challenges and Possible Solutions in the Global South. Water 14, 864. https://doi.org/10.3390/w14060864

Drewes, J.E., Hübner, U., Zhiteneva, V., Karakurt, S., 2017. Characterization of unplanned water reuse in the EU. pp.61.

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

Duquesne, J., Portela, S., 2024. Observatoire des services publics d'eau et d'assainissement - Panorama des services et de leur performance en 2022. Office français de la biodiversité. 179p.

Enault, J., Maldonado, T., Loret, J.F., 2024. L'évaluation en temps réel des risques microbiologiques en production d'eau potable. Techniques Sciences Méthodes. 3, 43–51. https://astee-tsm.fr/numeros/tsm-3-2024/enault/

ENHANCE, 2016. Novel Multi-Sector Partnerships in Disaster Risk Management. Results of the ENHANCE project. Jeroen Aerts and Jaroslav Mysiak (eds). EU FP7 project ENHANCE. Brussels. 346p.

Erickson, M.C., Liao, J., Cannon, J.L., Ortega, Y.R., 2015. Role of Brushes and Peelers in Removal of Escherichia coli O157:H7 and Salmonella from Produce in Domestic Kitchens. Journal of Food Protection. 78, 1624–1631. https://doi.org/10.4315/0362-028x.jfp-15-125

Espinosa, M.F., Sancho, A.N., Mendoza, L.M., Mota, C.R., Verbyla, M.E., 2020. Systematic review and meta-analysis of time-temperature pathogen inactivation. International Journal of Hygiene and Environmental Health 230, 113595. https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2020.113595

Etienne, M., 2009. Co-construction d'un modèle d'accompagnement selon la méthode ARDI : guide méthodologique. 76p. https://hal.inrae.fr/hal-02824306

Etienne, M., Du Toit, D.R., Pollard, S., 2011. ARDI: A Co-construction Method for Participatory Modeling in Natural Resources Management. E&S 16, 44. https://doi.org/10.5751/ES-03748-160144

Etienne, R., 2023. Accompagner des agriculteurs à l'aide d'une combinaison de jeux sérieux: quelles contributions aux changements de pratiques? [Thèse de doctorat]. Sciences agricoles. AgroParisTech. 255p.

European Commission, 2018. Commission staff working document - Impact assessment - Accompanying the document : *Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council on minimum requirements for water reuse*. European Commission, Brussels.

FAO, WHO, 2023. *Prevention and control of microbiological hazards in fresh fruits and vegetables – Parts 1 & 2: General principles. Meeting report.* Microbiological Risk Assessment Series. N°42. Rome. https://doi.org/10.4060/cc8490en

Faour-Klingbeil, D., Taybeh, A.O., Mahjoub, O., Almashaqbeh, O., Bou-Mitri, C., Samaha, J.J., Dhaouadi, L., Todd, E.C.D., 2023. Growers' irrigation practices, knowledge, trust, and attitudes toward wastewater reuse in Lebanon, Jordan, and Tunisia through a food safety lens. Water Practice & Technology 18, 2619–2637. https://doi.org/10.2166/wpt.2023.169

Feachem, R.G., Bradley, D.J., Garelick, H., Mara, D.D., 1983. Sanitation and Disease Health Aspects of Excreta and Wastewater Management (Work Bank Studies No. 3), Water Supply and Sanitation. World Bank, Washington, DC.

Ferrand, N., Hassenforder, E., Aquae-Gaudi, W., 2024. *The CoOPLAGE approach: When actors model their situation, principles or plans together for sustainable, empowering decision-making and change*, in: Transformative Participation for Socio-Ecological Sustainability - Around the CoOPLAGE Pathways, Update Sciences & Technologies. Quae, pp. 28–41.

Foschi, J., Turolla, A., Antonelli, M., Mitchell, J., 2022. Quantitative Microbial Risk Assessment for Risk-Based Management of Ultraviolet Disinfection of Wastewater for Agricultural Reuse. https://doi.org/10.2139/ssrn.4290238

Garin, P., Montginoul, M., Noury, B., 2021. Waste water reuse in France – social perception of an unfamiliar practice. Water Supply 21, 1913–1926. https://doi.org/10.2166/ws.2020.242

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

Gaye, M., Niang, S., 2010. Manuel des bonnes pratiques de l'utilisation saine des eaux usées dans l'agriculture urbaine, ENDA RUP (Relais pour le Développement Urbain Populaire). ed. Enda Rup, Dakar, Senegal. pp.131.

GCEW, 2023. Turning the Tide : A Call to Collective Action. Global Commission on the Economics Of Water. 32p.

Gomez, C.B., Ryser, E.T., Marks, B.P., 2021. Kitchen-Scale Treatments for Reduction of Listeria monocytogenes in Prepared Produce. Journal of Food Protection 84, 1603–1609. https://doi.org/10.4315/JFP-21-019

Gonzales-Gustavson, E., Rusiñol, M., Medema, G., Calvo, M., Girones, R., 2019. Quantitative risk assessment of norovirus and adenovirus for the use of reclaimed water to irrigate lettuce in Catalonia. Water Research 153, 91–99. https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.12.070

Goodwin, D., Raffin, M., Jeffrey, P., M. Smith, H., 2015. Applying the water safety plan to water reuse: towards a conceptual risk management framework. Environmental Science: Water Research & Technology 1, 709–722. https://doi.org/10.1039/C5EW00070J

Goodwin, D., Raffin, M., Jeffrey, P., Smith, H.M., 2019a. Collaboration on risk management: The governance of a non-potable water reuse scheme in London. Journal of Hydrology 573, 1087–1095. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.07.020

Goodwin, D., Raffin, M., Jeffrey, P., Smith, H.M., 2019b. Stakeholder evaluations of risk interventions for non-potable recycled water schemes: A case study. Science of The Total Environment 674, 439–450. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.044

Gouvernement français. 2023a. 53 mesures pour l'eau : Plan d'action pour une gestion résiliente et concertée de l'eau – Dossier de presse du 30 mars 2023. Disponible : https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/plan-daction-gestion-resiliente-concertee-leau

Gouvernement français. 2023b. *Consultations publiques – Eau et biodiversité*. *Projet d'arrêté relatif aux conditions de production et d'utilisation des eaux usées traitées pour l'irrigation de cultures et projet d'arrêté relatif aux conditions de production et d'utilisation des eaux usées traitées pour l'arrosage d'espaces verts*. https://www.consultations-publiques.developpement-durable.gouv.fr/projet-d-arrete-relatif-aux-conditions-de-a2861.html

Guillaume-Ruty, S., Meunier, A., Azais, A., Lombard-Latune, R., 2024. Réutilisation des eaux usées traitées : gestion des risques et performances des procédés de traitement au regard des nouvelles exigences réglementaires françaises. Astee TSM, Techniques Sciences Méthodes 81–99. https://doi.org/10.36904/20241081

Haas, C.N., Rose, J.B., Gerba, C.P., 2014. Quantitative Microbial Risk Assessment, 2nd edition. ed. John Wiley & Sons, Inc., New Jersey.

Hajare, R., Labhasetwar, P., Nagarnaik, P., 2021. Evaluation of pathogen risks using QMRA to explore wastewater reuse options: A case study from New Delhi in India. Water Science and Technology 83, 543–555. https://doi.org/10.2166/wst.2020.583

Hamilton, K.A., Hamilton, M.T., Johnson, W., Jjemba, P., Bukhari, Z., LeChevallier, M., Haas, C.N., 2018. Health risks from exposure to Legionella in reclaimed water aerosols: Toilet flushing, spray irrigation, and cooling towers. Water Research 134, 261–279. https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.12.022

Hartley, T.W., 2006. Public perception and participation in water reuse. Desalination 187, 115–126. https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.04.072

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

Hassenforder, E., Barreteau, O., Barataud, F., Souchère, V., Ferrand, N., Garin, P., 2020a. Enjeux et pluralité de la participation dans la gestion intégrée des ressources en eau, in: Leenhardt D., Voltz M., Barreteau O. (coord.). L'eau en milieu agricole. Outils et méthodes pour une gestion intégrée et territoriale. Versailles, Editions Quae, 288p. (pp.71-87) (coll. Synthèses) https://doi.org/10.35690/978-2-7592-3124-9

Hassenforder, E., Dray, A., Daré, W., 2020b. Manuel d'observation des jeux sérieux. CIRAD, Montpellier. 68p. https://doi.org/10.19182/agritrop/00113

Havelaar, A.H., Melse, J.M., 2003. Quantifying public health risk in the WHO Guidelines for Drinking-Water-Quality : A burden of disease approach (RIVM No. 734301022/2003).

Heida, A., Maal-Bared, R., Veillette, M., Duchaine, C., Reynolds, K.A., Ashraf, A., Ogunseye, O.O., Jung, Y., Shulman, L., Ikner, L., Betancourt, W., Hamilton, K.A., Wilson, A.M., 2024. Quantitative microbial risk assessment (QMRA) tool for modelling pathogen infection risk to wastewater treatment plant workers. Water Research 260, 121858. https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.121858

Helmecke, M., Fries, E., Schulte, C., 2020. Regulating water reuse for agricultural irrigation: risks related to organic micro-contaminants. Environmental Sciences Europe 32. https://doi.org/10.1186/s12302-019-0283-0

Houot, G. 2021. *Climat : dans la Limagne, les eaux usées de Clermont-Ferrand arrosent les cultures*. La Croix, 02/11/2021. [En ligne]. https://www.la-croix.com/Climat-Limagne-eaux-usees-Clermont-Ferrand-arrosent-cultures-2021-11-02-1201183251.

INEC, 2018. L'économie circulaire dans le petit cycle de l'eau :la réutilisation des eaux usées traitées. Institut national de l'économie circulaire.

INRAE, 2022. Irriguer différemment. INRAE. 03/06/2022. [En ligne]. https://www.inrae.fr/dossiers/lagriculture-va-t-elle-manquer-deau/irriguer-differemment

Ipcc, 2023. Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability: Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 1st ed. Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781009325844

IRCWD, 1985. Health Aspects of Nightsoil and Sludge Use in Agriculture and Aquaculture (No. 23), IRCWD News. WHO International Reference Centre for Wastes Disposal, Switzeland.

ISO, 2020. ISO 16075-2:2020 - Lignes directrices pour l'utilisation des eaux usées traitées en irrigation — Partie 2 : Développement du projet.

Ito, T., Kitajima, M., Kato, T., Ishii, S., Segawa, T., Okabe, S., Sano, D., 2017. Target virus log10 reduction values determined for two reclaimed wastewater irrigation scenarios in Japan based on tolerable annual disease burden. Water Research 125, 438–448. https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.08.057

Jeffrey, P., Russel, S., 2007. Participative Planning for Water Reuse Projects : A Handbook of Principles, Tools & Guidance. AQUAREC project. https://www.ircwash.org/resources/participative-planning-water-reuse-projects-handbook-principles-tools-and-guidance

Jiménez, B., Asano, T., 2008. Water reclamation and reuse around the world, in: Water Reuse: An International Survey of Current Practice, Issues and Needs, Scientific and Technical Report Series. IWA Publishing. https://doi.org/10.2166/9781780401881

Kalboussi, N., Biard, Y., Pradeleix, L., Rapaport, A., Sinfort, C., Ait-Mouheb, N., 2022. Life cycle assessment as decision support tool for water reuse in agriculture irrigation. Science of the Total Environment, 836. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155486

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

Karg, H., Drechsel, P., 2011. Motivating behaviour change to reduce pathogenic risk where unsafe water is used for irrigation. Water International 36, 476–490. https://doi.org/10.1080/02508060.2011.594684

Keraita, B., Drechsel, P., Konradsen, F., 2008. Perceptions of farmers on health risks and risk reduction measures in wastewater-irrigated urban vegetable farming in Ghana. Journal of Risk Research - 11, 1047–1061. https://doi.org/10.1080/13669870802380825

Laatabi, A., Becu, N., Marilleau, N., Amalric, M., Pignon-Mussaud, C., Anselme, B., Beck, E., Bertin, X., Monfort, A., Hayoun, C., Rousseaux, F., 2022. LittoSIM-GEN: A generic platform of coastal flooding management for participatory simulation. Environmental Modelling & Software 149, 105319. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2022.105319

Laperche, D., 2021. *Réutilisation des eaux usées : vers une ouverture à des nouveaux usages ? Actu Environnement*. [En ligne]. https://www.actu-environnement.com/ae/news/reutilisation-eaux-usees-ouverture-nouveaux-usages-37490.php4

Lautze, J., Stander, E., Drechsel, P., da Silva, A.K., Keraita, B., 2014. Global Experiences in Water Reuse, RESOURCE RECOVERY & REUSE SERIES 4. International Water Management Institute (IWMI). CGIAR Research Program on Water, Land and Ecosystems (WLE). https://doi.org/10.5337/2014.209

Lawrence, M.G., Williams, S., Nanz, P., Renn, O., 2022. Characteristics, potentials, and challenges of transdisciplinary research. One Earth 5, 44–61. https://doi.org/10.1016/j.oneear.2021.12.010

Lehot-Couette, M., 2024. *Paris 2024 : on vous explique comment franceinfo a analysé les données sur la qualité de l'eau de la Seine*. Franceinfo. 18/01/2024. [En ligne]. https://www.francetvinfo.fr/les-jeux-olympiques/paris-2024-on-vous-explique-comment-franceinfo-a-analyse-les-donnees-sur-la-qualite-de-l-eau-de-la-seine_6252078.html

Le Roy, J., Dubois, V., Tournebize, J., Lauvernet, C., Clément, R., 2020. Synthèse bibliographique: Impacts de l'infiltration d'eaux usées traitées sur les sols. INRAE UR-Reversaal. hal-03155946

Leclercq, C., 2023. *Économie circulaire de l'eau : le territoire attend le coup d'envoi de l'État. Biovallée*. [En ligne]. https://biovallee.net/economie-circulaire-de-leau-le-territoire-attend-le-coup-denvoi-de-letat/

Lejars, C., Fusillier, J.L., Bouarfa, S., Brunel, L., Rucheton, G., Girard, X., Golaz, F., 2012. Impacts de restrictions en eau d'irrigation sur les exploitations et les filières agricoles en Beauce. Agronomie, Environnement & Sociétés 2, 139–154. https://doi.org/hal-00833572

Leseur, B., 2023. Gestion des risques pathogènes dans les projets de REUT : caractérisation des coûts économiques liés aux mesures de gestion et production de données génériques. [Mémoire de stage M2]. Faculté de Droit, Sciences économiques et Gestion. Université de Rouen.

Licciardello, F., Milani, M., Consoli, S., Pappalardo, N., Barbagallo, S., Cirelli, G., 2018. Wastewater tertiary treatment options to match reuse standards in agriculture. Agricultural Water Management 210, 232–242. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.08.001

Lindgaard, J., Pascariello, P., Rouget, A. 2024. *Eau de la Seine : les mauvais chiffres que les organisateurs des JO voulaient cacher*. Mediapart. 07/08/2024. [En ligne] https://www.mediapart.fr/journal/france/070824/eau-de-la-seine-les-mauvais-chiffres-que-les-organisateurs-des-jo-voulaient-cacher

Locqueville, B., Seffray, É., Simon-Delavelle, F., Debrieu-Levrat, C., Guery, B., 2023. Faciliter le recours aux eaux non conventionnelles - Mission flash conjointe CGAAER - IGAS - IGEDD.

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

Lombard-Latune, R., 2019. Innover pour les services d'assainissement en zone tropicale: approche technique par filtres plantés de végétaux et accompagnement par modélisation participative. (Thèse de doctorat). Génie des procédés. Université de Lyon. 160p.

Lombard-Latune, R., Bruyère, M., 2023. Panorama de la réutilisation des eaux usées traitées en France en 2022 : Etat des lieux de la REUT en France en 2022 et évolutions depuis 2017. 36p.

Loudhaief, S., 2021. Etude des risques microbiologiques liés à la réutilisation des eaux usées traitées en agriculture et de leur gestion par l'approche Multi-barrières. [Mémoire de stage M2]. Master Sciences, Technologies, Santé. Université de Bourgogne.

Maffettone R., Gawlik B.M., 2022. Technical Guidance - Water Reuse Risk Management for Agricultural Irrigation Schemes in Europe, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2022, https://data.europa.eu/doi/10.2760/590804

Mainardis, M., Cecconet, D., Moretti, A., Callegari, A., Goi, D., Freguia, S., Capodaglio, A.G., 2022. Wastewater fertigation in agriculture: Issues and opportunities for improved water management and circular economy. Environmental Pollution 296, 118755. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118755

Mara, D., Horan, N., 2003. Handbook of Water and Wastewater Microbiology, Academic Press, London.

Mara, D.D., Sleigh, P.A., Blumenthal, U.J., Carr, R.M., 2007. Health risks in wastewater irrigation: Comparing estimates from quantitative microbial risk analyses and epidemiological studies. Journal of Water and Health, IWA Publishing 5, 39–50. https://doi.org/10.2166/wh.2006.055

Mara, D.D., Sleigh, A., 2010. Estimation of norovirus and Ascaris infection risks tourban farmers in developing countries using wastewaterfor crop irrigation. Journal of Water and Health 8, 572–576. https://doi.org/10.2166/wh.2010.097

MASA, 2023. *Distances de sécurité pour les traitements phytopharmaceutiques à proximité des habitations*. Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire. [En ligne]. https://agriculture.gouv.fr/distances-de-securite-pour-les-traitements-phytopharmaceutiques-proximite-des-habitations . Consulté le 16/10/2024.

MASA, 2024. La réglementation sur l'hygiène des aliments. Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire. [En ligne]. https://agriculture.gouv.fr/la-reglementation-sur-lhygiene-des-aliments . Consulté le 16/10/2024.

Massiot, G., Courault, D., Jacob, P., Albert, I., 2023. Monitoring the risk of Legionella infection using a general Bayesian network updated from temporal measurements in agricultural irrigation with reclaimed wastewater. Environ. Sci.: Water Res. Technol. 9, 176–192. https://doi.org/10.1039/D2EW00311B

McConville, J.R., Billger, M., Niwagaba, C.B., Kain, J.-H., 2023. Assessing the potential to use serious gaming in planning processes for sanitation designed for resource recovery. Environmental Science & Policy 145, 262–274. https://doi.org/10.1016/j.envsci.2023.04.002

McLennan, C., Rudi, G., Altchenko, Y., Ait-Mouheb, N., 2024. Will the European Regulation for water reuse for agricultural irrigation foster this practice in the European Union? Water Reuse 00, 21. https://doi.org/10.2166/wrd.2024.012

Messner, M.J., Berger, P., Nappier, S.P., 2014. Fractional Poisson—A Simple Dose-Response Model for Human Norovirus. Risk Analysis 34, 1820–1829. https://doi.org/10.1111/risa.12207

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

Meunier, A., Guillaume, S., Besnault, S., Boissel, M., Lombard-Latune, R., 2024. Etat des lieux de l'abattement sur les micro-organismes pathogènes par les différents procédés de traitements des produits et sous-produits de l'assainissement. Rapport pS-Eau, 110 pages.

Michetti, M., Raggi, M., Guerra, E., Viaggi, D., 2019. Interpreting Farmers' Perceptions of Risks and Benefits Concerning Wastewater Reuse for Irrigation: A Case Study in Emilia-Romagna (Italy). Water 11, 108. https://doi.org/10.3390/w11010108

Mirra, L., Russo, S., Borrello, M., 2024. Exploring Factors Shaping Farmer Behavior in Wastewater Utilization for Agricultural Practices: A Rapid Review. Sustainability 16, 2870. https://doi.org/10.3390/su16072870

Mok, H.-F., Barker, S.F., Hamilton, A.J., 2014. A probabilistic quantitative microbial risk assessment model of norovirus disease burden from wastewater irrigation of vegetables in Shepparton, Australia. Water Res 54, 347–362. https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.01.060

Molle, B., Huet, L., Tomas, S., Granier, J., Dimaiolo, P., Rosa, C., 2009. Caractérisation du risque de dérive et d'évaporation d'une gamme d'asperseurs d'irrigation Application à la définition des limites d'utilisation de l'aspersion en réutilisation d'eaux usées traitées. (Rapport technique). irstea. 74p.

Molle, B., Brelle, F., Bessy, J., Gatel, D., 2012. Which water quality for which uses ? Overcoming over-zealous use of the precautionary principle to reclaim wastewater for appropriate irrigation uses. Irrig. and Drain. 61, 87–94. https://doi.org/10.1002/ird.1662

Monin, 2023. *A Noirmoutier, on utilise l'eau des stations d'épuration pour l'agriculture : « Sur l'île, il n'y a pas de nappes phréatiques d'eau potable »*. France Info, 25/01/2023. [En ligne]. https://www.francetvinfo.fr/monde/environnement/reportage-a-noirmoutier-on-utilise-l-eau-des-stations-d-epuration-pour-l-agriculture-sur-l-ile-il-n-y-a-pas-de-nappes-phreatiques-d-eau-potable_5622401.html . Consulté le 15/10/2024.

Monfort, A., 2023. Réception sociale des modes de gestion du risque de submersion marine: une approche d'évaluation de la simulation participative appliquée aux littoraux français métropolitains. [Thèse de doctorat]. Université de La Rochelle. 467p.

Mori, J., Uprety, S., Mao, Y., Koloutsou-Vakakis, S., Nguyen, T.H., Smith, R.L., 2021. Quantification and Comparison of Risks Associated with Wastewater Use in Spray Irrigation. Risk Analysis 41, 745–760. https://doi.org/10.1111/risa.13607

Navarro, I., Jiménez, B., 2011. Evaluation of the WHO helminth eggs criteria using a QMRA approach for the safe reuse of wastewater and sludge in developing countries. Water Science and Technology 63, 1499–1505. https://doi.org/10.2166/wst.2011.394

Noury, B., 2021. Acceptabilité sociale et communication participative : le cas de la réutilisation des eaux usées traitées dans le Luberon. [Thèse de doctorat]. Aix-Marseille. 462p.

Noury, B., Espuny, C.P., Ferrand, N., 2019. How can participation and communication support decisions towards wastewater reuse projects? A methodological proposal. Waterlines: Confluence and Hope through Environmental Communication, The International Environmental Communication Association; University of British Columbia, Jun 2019, Vancouver, Canada. https://amu.hal.science/hal-02572030

NRC, 1996. Use of Reclaimed Water and Sludge in Food Crop Production. Committee on the Use of Treated Municipal Wastewater Effluents and Sludge in the Production of Crops for Human Consumption, National Research Council, Washington, DC.

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

NRMMC, EPHC, AHMC, 2006. National guidelines for water recycling: managing health and environmental risks (phase 1). Environment Protection and Heritage Council, Adelaïde. 415p.

Oakley, S., Mihelcic, J.R., 2019. Pathogen Reduction and Survival in Complete Treatment Works, in: Water and Sanitation for the 21st Century: Health and Microbiological Aspects of Excreta and Wastewater Management (Global Water Pathogen Project). Michigan State University. https://doi.org/10.14321/waterpathogens.49

Ofori, S., Puskacova, A., Ruzickova, I., Wanner, J., 2021. Treated wastewater reuse for irrigation: Pros and cons. Science of The Total Environment 760, 144026. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144026

ONU. 1992. *Déclaration de Rio sur l'environnement et le développement.* Conférence des Nations Unies sur l'environnement et le développement, Rio de Janeiro, Brésil https://www.un.org/french/events/rio92/rio-fp.htm

Orlofsky, E., Bernstein, N., Sacks, M., Vonshak, A., Benami, M., Kundu, A., Maki, M., Smith, W., Wuertz, S., Shapiro, K., Gillor, O., 2016. Comparable levels of microbial contamination in soil and on tomato crops after drip irrigation with treated wastewater or potable water. Agriculture, Ecosystems & Environment 215, 140–150. https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.08.008

Oron, G., DeMalach, Y., Hoffman, Z., Keren, Y., Hartman, H., Plazner, N., 1991. Wastewater Disposal by Sub-Surface Trickle Irrigation. Water Science and Technology 23, 2149–2158. https://doi.org/10.2166/wst.1991.0672

Ostrom, E., 1990. Governing the commons : The Evolution of Institutions for Collective Action. Cambridge University Press.

Pages, E., Parisse, S., 2024. L'irrigation des surfaces agricoles : évolution entre 2010 et 2020. Ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires. https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/media/7153/download?inline

Paranychianakis, N.V., Salgot, M., Snyder, S.A., Angelakis, A.N., 2015. Water Reuse in EU States: Necessity for Uniform Criteria to Mitigate Human and Environmental Risks. Critical Reviews in Environmental Science and Technology 45, 1409–1468. https://doi.org/10.1080/10643389.2014.955629

Pepper, I.L., Gerba, C.P., 2018. Risk of infection from Legionella associated with spray irrigation of reclaimed water. Water Research 139, 101–107. https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.04.001

Petit, O., 2009. La politique de gestion des eaux souterraines en France : Une analyse en termes de gestion intégrée. Économie rurale 309, 50–64. https://doi.org/10.4000/economierurale.300

Petterson, S., Ashbolt, N., Sharma, A., 2001a. Microbial risks from wastewater irrigation of salad crops: a screening-level risk assessment. Water environment research, 74(4): 411. https://doi.org/10.2175/106143001x143402

Petterson, S.R., Teunis, P.F.M., Ashbolt, N.J., 2001b. Modeling Virus Inactivation on Salad Crops Using Microbial Count Data. Risk Analysis 21, 1097–1108. https://doi.org/10.1111/0272-4332.216178

Pezzuto, A., Belluco, S., Losasso, C., Patuzzi, I., Bordin, P., Piovesana, A., Comin, D., Mioni, R., Ricci, A., 2016. Effectiveness of Washing Procedures in Reducing Salmonella enterica and Listeria monocytogenes on a Raw Leafy Green Vegetable (Eruca vesicaria). Frontiers in Microbiology 7. https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmicb.2016.01663

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

Plénet, D., Simon, S., Vercambre, G., Lescourret, F., 2010. Systèmes de culture en arboriculture fruitière et qualité des fruits.Innovations Agronomiques 9, 85-105. https://doi.org/10.17180/RQ85-HG98

QMRA WIKI. 2024. Cryptosporidium parvum. [En ligne]. https://qmrawiki.org/pathogens/cryptosporidium-parvum Consulté le 15/10/2024.

Racine, J., Nerney, A., Kilgore, S., Darner, J., Spets, M., Critzer, F., Harris, L.J., Reitz, S., Waters, T., Waite-Cusic, J., 2024. Irrigation Method Matters: Contamination and Die-off Rates of Escherichia coli on Dry Bulb Onions After Overhead and Drip Irrigation in Washington State (2022–2023). Journal of Food Protection 87, 100326. https://doi.org/10.1016/j.jfp.2024.100326

Radcliffe, J.C., Declan, P., 2020. Water reuse and recycling in Australia — history, current situation and future perspectives. Water Cycle 1, 19–40. https://doi.org/10.1016/j.watcyc.2020.05.005

Raude, J., 2007. La perception du risque : théories et données empiriques. Revue des Sciences Sociales 38, 20–29. https://doi.org/10.3406/revss.2007.1680

Rebelo, A., Quadrado, M., Franco, A., Lacasta, N., Machado, P., 2020. Water reuse in Portugal: New legislation trends to support the definition of water quality standards based on risk characterization. Water Cycle 1, 41–53. https://doi.org/10.1016/j.watcyc.2020.05.006

Reyes Esteves, R., Gerba, C., Slack, D., 2020. Evaluation of subsurface irrigation on microorganism contamination of romaine lettuce. E3S Web of Conferences 187, 04009. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202018704009

Ricart, S., Rico, A.M., Ribas, A., 2019. Risk-Yuck Factor Nexus in Reclaimed Wastewater for Irrigation: Comparing Farmers' Attitudes and Public Perception. Water 11, 187. https://doi.org/10.3390/w11020187

Rizzo, L., Gernjak, W., Krzeminski, P., Malato, S., McArdell, C.S., Sanchez Perez, J.A., Schaar, H., Fatta-Kassinos, D., 2020. Best available technologies and treatment trains to address current challenges in urban wastewater reuse for irrigation of crops in EU countries. Science of the Total Environment. 710, 136312. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136312

Rock, C.M., Brassill, N., Dery, J.L., Carr, D., McLain, J.E., Bright, K.R., Gerba, C.P., 2019. Review of water quality criteria for water reuse and risk-based implications for irrigated produce under the FDA Food Safety Modernization Act, produce safety rule. Environmental Research 172, 616–629. https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.12.050

Ross, V.L., Fielding, K.S., Louis, W.R., 2014. Social trust, risk perceptions and public acceptance of recycled water: testing a social-psychological model. J Environ Manage 137, 61–68. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.01.039

Sadovski, A.Y., Fattal, B., Goldberg, D., 1978. Microbial Contamination of Vegetables Irrigated with Sewage Effluent by the Drip Method. J Food Prot 41, 336–340. https://doi.org/10.4315/0362-028X-41.5.336

Sampaio, V., Santos, A.S.P., Lima, M.M., 2024. Decision support tools for water reuse: a systematic review. Water Science and Technology 90, 2713–2733. https://doi.org/10.2166/wst.2024.361

Sano, D., Haas, C., Rose, J.B., 2019. A QMRA Framework for Sanitation Treatment Decisions, in: Michigan State University, Rose, J.B., Jiménez Cisneros, B., UNESCO - International Hydrological Programme (Eds.), Water and Sanitation for the 21st Century: Health and Microbiological Aspects of Excreta and Wastewater Management (Global Water Pathogen Project). Michigan State University. https://doi.org/10.14321/waterpathogens.3

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

Santé Canada, 2019. Conseils sur l'utilisation de l'évaluation quantitative du risque microbien dans l'eau potable (No. H144- 59/2019F- PDF). Bureau de la qualité de l'eau et de l'air, Direction générale de la santé environnementale et de la sécurité des consommateurs, Santé Canada, Ottawa (Ontario).

Santé Publique France, 2023. Campylobacter. URL https://www.santepubliquefrance.fr/maladies-et-traumatismes/maladies-infectieuses-d-origine-alimentaire/campylobacter (accessed 9.19.24).

Schijven, J.F., Teunis, P.F.M., Rutjes, S.A., Bouwknegt, M., De Roda Husman, A.M., 2011. QMRAspot: A tool for Quantitative Microbial Risk Assessment from surface water to potable water. Water Research 45, 5564–5576. https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.08.024

Schlüter, M., Müller, B., Frank, K., 2019. The potential of models and modeling for social-ecological systems research: the reference frame ModSES. Ecology and Society 24, 31. https://doi.org/10.5751/ES-10716-240131

Seidu, R., Heistad, A., Amoah, P., Drechsel, P., Jenssen, P.D., Stenström, T.-A., 2008. Quantification of the health risk associated with wastewater reuse in Accra, Ghana: a contribution toward local guidelines. Journal of Water and Health 6, 461–471. https://doi.org/10.2166/wh.2008.118

Seis, W., Rouault, P., Miehe, U., Ten Veldhuis, M.-C., Medema, G., 2022. Bayesian estimation of seasonal and between year variability of Norovirus infection risks for workers in agricultural water reuse using epidemiological data. Water Research 224, 119079. https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.119079

Serra Wittling, C., Molle, B., 2017. Evaluation des économies d'eau à la parcelle réalisables par la modernisation des systèmes d'irrigation. IRSTEA. 151p.

Shoushtarian, F., Negahban-Azar, M., 2020. Worldwide Regulations and Guidelines for Agricultural Water Reuse: A Critical Review. Water, 12 (4), 971. https://doi.org/10.3390/w12040971

Shuval, H., Lampert, Y., Fattal, B., 1997. Development of a risk assessment approach for evaluating wastewater reuse standards for agriculture. Water Science and Technology, Health-Related Water Microbiology 1996 35, 15–20. https://doi.org/10.10ac16/S0273-1223(97)00228-X

Shuval, H., Fattal, B., 2003. Control of pathogenic microorganisms in wastewater recycling and reuse in agriculture, in: *Handbook of Water and Wastewater Microbiology*. Elsevier, pp. 241–262. https://doi.org/10.1016/B978-012470100-7/50016-9 (chapitre)

Silverman, A.I., Akrong, M.O., Amoah, P., Drechsel, P., Nelson, K.L., 2013. Quantification of human norovirus GII, human adenovirus, and fecal indicator organisms in wastewater used for irrigation in Accra, Ghana. Journal of Water and Health 11, 473–488. https://doi.org/10.2166/wh.2013.025

Stamm, M., Dray-Giger, A., Hofmann, A., 2017. Adapting and evaluating the CoPalCam role- playing game on the issue of palm oil with secondary school students.

Stellacci, P., Liberti, L., Notarnicola, M., Haas, C.N., 2010. Hygienic sustainability of site location of wastewater treatment plants: A case study. II. Estimating airborne biological hazard. Desalination 253, 106–111. https://doi.org/10.1016/j.desal.2009.11.024

Sydney Water. 2024. Recycled water. [En ligne]. https://www.sydneywater.com.au/plumbing-building-developing/plumbing/recycled-water.html Consulté le 15/10/2024.

Tanaka, H., Asano, T., Schroeder, E.D., Tchobanoglous, G., 1998. Estimating the safety of wastewater reclamation and reuse using enteric virus monitoring data. Water Environment Research 70, 39–51. https://doi.org/10.2175/106143098X126874

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

Thomas, G.A., Paradell Gil, T., Müller, C.T., Rogers, H.J., Berger, C.N., 2024. From field to plate: How do bacterial enteric pathogens interact with ready-to-eat fruit and vegetables, causing disease outbreaks? Food Microbiology 117, 104389. https://doi.org/10.1016/j.fm.2023.104389

Toze, S., 2006. Water reuse and health risks — real vs. perceived. Desalination 187, 41–51. https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.04.066

UN-Habitat and WHO, 2024. Progress on the proportion of domestic and industrial wastewater flows safely treated - Mid-term status of SDG Indicator 6.3.1 and acceleration needs, with a special focus on climate change, wastewater reuse and health. United Nations Human Settlements Programme (UN-Habitat) and World Health Organization (WHO), Switzerland. 126p.

U.S. EPA, 2012. Guidelines for Water Reuse. United State Environmental Protection Agency, Washington, DC.

Van Buuren, A., van Meerkerk, I., Tortajada, C., 2019. Understanding emergent participation practices in water governance. International Journal of Water Resources Development, 35(3), 367–382. https://doi.org/10.1080/07900627.2019.1585764

Van Ginneken, M., Oron, G., 2000. Risk assessment of consuming agricultural products irrigated with reclaimed wastewater: An exposure model. Water Resour. Res. 36, 2691–2699. https://doi.org/10.1029/2000WR900106

Villarin, M.C., Merel, S., 2020. Paradigm shifts and current challenges in wastewater management. Journal of Hazardous Materials. 390, 122139. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122139

WateReuse California Communications Collaborative Group, 2021. WateReuse California Recycled Water Signage Guidelines. https://watereuse.org/wp-content/uploads/2021/02/WateReuse-California- Signage-Guidelines-2021.pdf

WHO, 1973. Reuse of effluents : methods of wastewater treatment and health safeguards - Report of a WHO Meeting of Experts (No. 517), Technical report series. World Health Organization, Geneva. / en vf : OMS, 1974. Evacuation des eaux usées des collectivités : Rapport d'un Comité d'experts de l'OMS. Organisation mondiale de la Santé, Genève.

WHO, 1989. Health guidelines for the use of wastewater in agriculture and aquaculture (Technical Report Series No. 778). World Health Organization, Geneva. / OMS, 1989. L'utilisation des eaux usées en agriculture et en aquaculture : recommandations à visées sanitaires. Série de Rapports techniques (N°541). Organisation mondiale de la Santé, Genève.

WHO, 2006. Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater : Volume II - Wastewater use in agriculture. World Health Organization, United Nations Environment Programme. Geneva. pp.222. En français : OMS, 2012. Directives OMS pour l'utilisation sans risque des eaux usées, des excréta et des eaux ménagères. Organisation Mondiale de la Santé. Programme des Nations Unies pour l'Environnement. Genève. pp.254.

WHO, 2016Aa. Quantitative Microbial Risk Assessment: Application for Water Safety Management. World Health Organization, Geneva.

WHO, 2016Ab. Sanitation safety planning - Manual for sage use and disposal of wastewater, greywater and excreta. World Health Organization, Geneva. 156p.

WHO, 2022. Guidelines for drinking-water quality : fourth edition incorporating the first and second addenda. World Health Organization, Geneva.

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

WHO, 2024. *Global Health Estimates 2021: Disease burden by Cause, Age, Sex, by Country and by Region, 2000-2021.* Geneva. World Health Organisation. URL https://www.who.int/data/gho/data/themes/mortality-and-global-health-estimates/global-health-estimates-leading-causes-of-dalys (consulté le 10/07/2024).

Wikipedia, 2024. *Disability-adjusted life year*. [En ligne]. https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Disability-adjusted_life_year&oldid=1242611297 (consulté le 22/09/2024).

Wilson, R.S., Zwickle, A., Walpole, H., 2019. Developing a Broadly Applicable Measure of Risk Perception. Risk Analysis 39, 777–791. https://doi.org/10.1111/risa.13207

Winkler, M., Jackson, D., Sutherland, D., Payden, Lim, J.U., Srikantaiah, V., Fuhrimann, S., Medlicott, K., 2017. Sanitation safety planning as a tool for achieving *safely managed sanitation* systems and safe use of wastewater. WHO South-East Asia J Public Health 6, 34. https://doi.org/10.4103/2224-3151.213790

World Aquatics 2024. Competition regulation. [En ligne]. https://www.worldaquatics.com/rules/competition-regulations (consulté le 17/07/2024)

World Bank, 2016. Agricultural Sector Risk Assessment: Methodological Guidance for Practitioners. World Bank, Washington, DC. https://doi.org/10.1596/23778

WWAP, 2017. Les eaux usées - Une ressource inexploitée (Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau 2017). UNESCO, Paris. 203p.

Zardari, M., Tomas, S., Molle, B., Courault, D., 2022. Empirical modeling of aerosol transport from sprinkler irrigation. Irrig Sci 41, 425–444. https://doi.org/10.1007/s00271-022-00822-x

Zhiteneva, V., Carvajal, G., Shehata, O., Hübner, U., Drewes, J.E., 2021. Quantitative microbial risk assessment of a non-membrane based indirect potable water reuse system using Bayesian networks. Science of The Total Environment 780, 146462. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146462

Zhiteneva, V., Hubner, U., Medema, G.J., Drewes, J.E., 2020. Trends in conducting quantitative microbial risk assessments for water reuse systems: A review. Microb. Risk Anal. 16, 100132. https://doi.org/10.1016/j.mran.2020.10013210.1016/j.mran.2020.100132

- **Textes**

Arrêté du 19 octobre 2006 relatif à l'emploi d'auxiliaires technologiques dans la fabrication de certaines denrées alimentaires. JORF n°279 du 2 décembre 2006. https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000000271061

Arrêté du 02 août 2010 relatif à l'utilisation d'eaux issues du traitement d'épuration des eaux résiduaires urbaines pour l'irrigation de cultures ou d'espaces verts. JORF n°0201 du 31 août 2010. https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFSCTA000022753545

Arrêté du 25 juin 2014 modifiant l'arrêté du 2 août 2010 relatif à l'utilisation d'eaux issues du traitement d'épuration des eaux résiduaires urbaines pour l'irrigation de cultures ou d'espaces verts. JOFR n°154 du 04 juillet 2014. www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000029186641/

Arrêté du 27 décembre 2019 relatif aux mesures de protection des personnes lors de l'utilisation de produits phytopharmaceutiques et modifiant l'arrêté du 4 mai 2017 relatif à la mise sur le marché et à l'utilisation des produits phytopharmaceutiques et de leurs adjuvants visés à l'article L. 253-1 du code

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

rural et de la pêche maritime – JORF n°0302 du 29 décembre 2019. https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/LEGISCTA000039800255

Arrêté du 28 juillet 2022 relatif au dossier de demande d'autorisation d'utilisation des eaux usées traitées. JORF n°0179 du 4 août 2022. https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000046138725/

Arrêté du 18 décembre 2023 relatif aux conditions de production et d'utilisation des eaux usées traitées pour l'irrigation de cultures. JORF n°0300 du 28 décembre 2023. https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000048679665

Règlement (UE) 2020/741 du Parlement européen et du Conseil du 25 mai 2020 relatif aux exigences minimales applicables à la réutilisation de l'eau (Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE). Journal officiel de l'Union Européenne du 05 juin 2020. L177/32. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=celex%3A32020R0741

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés

FOLIO ADMINISTRATIF

THESE DE L'INSA LYON, MEMBRE DE L'UNIVERSITE DE LYON

NOM : THOMAS DATE de SOUTENANCE : 12/12/2024

Prénoms : Alice-Rose

TITRE :

Application de l'approche Multi-barrières pour la réutilisation des eaux usées traitées : Construction d'un outil de simulation participative pour accompagner l'évaluation et la gestion des risques microbiologiques

NATURE : Doctorat Numéro d'ordre : 2024ISAL0115

Ecole doctorale : ED 206

Spécialité : Environnement

RESUME :

Les risques sanitaires associés aux micro-organismes pathogènes doivent être gérer afin d'assurer la protection de la santé publique lors de la réutilisation des eaux usées en particulier pour l'irrigation agricole. Des procédés de traitement avancés peuvent être mis en place pour atteindre les objectifs réglementaires de qualité. Cela nécessite des compétences techniques et génère des coûts économiques généralement importants. La mise en place de mesures « barrières » post-traitement est également envisagée par la réglementation pour assurer une gestion suffisante des risques même si la qualité requise n'est pas atteinte. Cette approche, encouragée par l'OMS, invite à considérer la contribution non-négligeable des équipements utilisés et des pratiques mises en place au-delà du traitement. Cela implique néanmoins une gestion plus systémique et donc multi-acteurs. Les choix de gestion auront donc des impacts sanitaires, économiques et organisationnels qui nécessitent une mise en discussion avec l'ensemble des acteurs concernés. Quelle que soit l'approche choisie, elle doit répondre à une évaluation des risques nécessitant un vaste ensemble de connaissances. Un état de l'art a tout d'abord permis de constituer une base de données comprenant un modèle d'évaluation quantitative des risques (QMRA) et des informations sur les mesures de gestion envisageables et les impacts associés. Ces éléments ont été rassemblés dans un outil de simulation participative qui permet de créer, tester et simuler collectivement des scénarios de gestion des risques. Il a été co-construit avec des acteurs du cas de Clermont-Ferrand. Cet outil a été utilisé sur trois cas concrets qui ont confirmé que la perception des risques et de leur gestion était hétérogène et qu'une construction collective était nécessaire pour partager les représentations individuelles et encourager la compréhension mutuelle. L'intégration d'autres facteurs au-delà des impacts sanitaires associés aux choix de gestion contribue à construire des filières de REUT durables.

MOTS-CLÉS : Réutilisation des eaux usées, Micro-organismes pathogènes, Risques sanitaires, Approche multi-barrières, Gestion collective, Modélisation d'accompagnement, Simulation participative, QMRA.

Laboratoire (s) de recherche : UR REVERSAAL – INRAE Lyon-Grenoble Auvergne-Rhône-Alpes

Directeur de thèse : MOLLE Pascal

Président de jury : BAYARD Rémy

Composition du jury :

COURAULT Dominique (INRAE), BECU Nicolas (CNRS), BAYARD Rémy (INSA-Lyon), GRIMBUHLER Sonia (INRAE), MOLLE Pascal (INRAE), LOMBARD-LATUNE (Rémi), HASSENFORDER Emeline (CIRAD), DECLERCQ Rémi (ECOFILAE), ARNAULT, Camille (AE RMC)

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2024ISAL0115/these.pdf © [A-R. Thomas], [2024], INSA Lyon, tous droits réservés