THÈSE DE DOCTORAT D'AVIGNON UNIVERSITÉ

École Doctorale N° 536
Agrosciences & Sciences

Spécialité / Discipline de doctorat :
Santé environnementale / Sciences de la vie
Domaine du doctorat :
Agrosciences, Environnement et Santé

Laboratoire de Toxicologie Environnementale
UR INRAE 0406 A&E

Présentée par **Guillaume Karr**

CONTRIBUTION DE LA DEMARCHE D'ÉVALUATION DES RISQUES SANITAIRES (ERS) À L'ÉLABORATION DE POLITIQUES PUBLIQUES VISANT DES ENVIRONNEMENTS FAVORABLES À LA SANTÉ

Apports, limites et applications possibles dans le cadre du plan national santé-environnement (PNSE)

Soutenue publiquement le 3 février 2026 devant le jury composé de :

- M. Christophe Minier, Professeur et chercheur (effets de composés chimiques sur le système endocrinien), Université Le Havre Normandie – **Rapporteur, Président du jury**
- Mme Myriam Merad, Directrice de recherche (gouvernance des risques technologiques, naturels et industriels ; aide à la décision), CNRS / UMR LAMSADE - **Rapporteure**
- Mme Isabelle Deportes, Ingénieure impacts sanitaires et environnementaux de l'économie circulaire, ADEME - **Examinatrice**
- M. Luc Belzunces, Directeur de recherche de classe exceptionnelle, Laboratoire de Toxicologie Environnementale, INRAE - **Directeur de thèse**
- M. Arnaud Charmoille, Responsable de l'unité Impact sanitaire et expositions (ISAE), INERIS - **Membre Invité**
- Mme Alice James, Ingénieure de recherche spécialisée en évaluation des risques environnementaux, INERIS - **Membre Invitée**

Résumé

Le domaine de la santé environnementale présente de forts enjeux : (i) les impacts sanitaires estimés sont élevés, bien que probablement sous-estimés, avec notamment plusieurs dizaines de milliers de décès par an, en France, attribuables aux polluants les mieux connus ; (ii) certaines populations présentent des sensibilités particulières aux polluants, comme par exemple les jeunes enfants, dont le corps est en cours de construction ; (iii) le plan national santé-environnement (PNSE), qui vise à mettre en cohérence de nombreuses politiques publiques en matière de santé environnementale, fait l'objet d'évaluations officielles particulièrement critiques, soulignant notamment le manque de résultats en termes de réduction des risques mesurable pour la population générale. Dans ce contexte, quels types d'éclairages pourraient aider les pouvoirs publics à élaborer des politiques plus efficaces en matière de santé environnementale ? La présente thèse décrit et discute différents apports qui peuvent être produits en s'appuyant sur la démarche d'évaluation des risques sanitaires (ERS), comme autant d'éléments de réponse à cette problématique. Ces apports sont illustrés avec des études de cas portant sur plusieurs thèmes : hiérarchisation de substances préoccupantes, amélioration de la qualité de l'air intérieur, étiquetage portant sur les émissions de polluants volatils issus de produits de consommation courante, maîtrise des émissions des sites industriels dans les milieux environnementaux, usage de renaturation dans la gestion des sols pollués. Des perspectives de potentiels futurs apports d'intérêt sont également discutés, incluant la faisabilité d'adapter la démarche ERS aux effets sanitaires bénéfiques de certains environnements naturels.

Mots clés : Santé environnementale ; évaluation des risques sanitaires, politiques publiques, environnements favorisant la santé, aide à la décision.

Abstract

The field of environmental health presents significant issues: (i) the estimated health impacts are high, although probably underestimated, with tens of thousands of deaths per year in France attributable to the best-known pollutants; (ii) certain populations are particularly sensitive to pollutants, such as young children, whose bodies are still developing; (iii) the French National Environmental Health Plan (PNSE), which aims to coordinate numerous public policies in the field of environmental health, has been the subject of critical official evaluations, highlighting in particular the lack of measurable risk reduction for the general population. In this context, what kinds of insights could help public authorities develop more effective environmental health policies? This thesis describes and discusses various contributions that can be made based on the health risk assessment (HRA) approach, as possible elements of answers to this issue. These contributions are illustrated with case studies on several topics: prioritization of substances of concern, improvement of indoor air quality, labeling of volatile pollutant emissions from everyday consumer products, control of emissions from industrial sites into the environment, and use of renaturation in the management of contaminated soil. Prospectives for potential future contributions of interest are also discussed, including the feasibility of adapting the HRA approach to the beneficial health effects of certain natural environments.

Keywords: Environmental health; health risk assessment, public policy, health-promoting environments, decision support.

Remerciements

Les travaux présentés dans cette thèse se sont appuyés sur de nombreux échanges, soutiens et inspirations. Je souhaite donc adresser ma gratitude à l'ensemble des personnes, institutions et théories qui ont contribué à alimenter, soutenir et faire avancer ces travaux. C'est avant tout dans les références bibliographiques que je trace ma reconnaissance ; en complément, je souhaiterais mentionner quelques personnes clés qui ont contribué à rendre cette thèse possible.

En premier lieu, je remercie Luc Belzunces qui, en tant que responsable du Laboratoire de toxicologie environnementale à l'INRAE, m'a donné l'opportunité de présenter cette thèse sous la forme d'une validation des acquis de l'expérience, et à cette occasion, de prendre du recul sur mon travail. Merci, Luc, pour ton accompagnement, ton soutien et ta bonne humeur communicative !

Plus généralement, je remercie l'INRAE, Avignon Université et l'École doctorale Agrosciences et Sciences pour m'avoir permis de réaliser ce doctorat au sein de leur organisation et de leurs locaux. En particulier, je souhaiterais remercier Johanne Gutierrez et Mélanie Bergia pour leur appui au cours des procédures administratives.

Je remercie également l'Ineris de m'avoir fait confiance pour réaliser des travaux à forts enjeux. Plus particulièrement, je remercie Arnaud Charmoille pour son appui dans ma progression technique et scientifique de ces dernières années. J'apprécie beaucoup, Arnaud, tous tes efforts visant à concilier au mieux les différents besoins en présence.

Je remercie chaleureusement les membres du jury pour leur disponibilité et pour leur lecture experte. C'est un honneur de voir figurer vos noms sur ce manuscrit de thèse.

Je tiens également à saluer tous les co-auteurs des travaux présentés dans cette thèse, pour les collaborations intéressantes et les échanges enrichissants.

Je souhaite exprimer ma profonde gratitude aux personnes qui ont accepté d'être les mentors de ma vie professionnelle : Roseline Bonnard, Denis Zmirou-Navier et Martine Ramel. Votre accompagnement expert et amical a été et est toujours un élément clé de ma progression. Et que de plaisir à échanger ensemble !

Je souhaiterais également saluer les scientifiques de référence du domaine de la santé environnementale. Pour en citer quelques-uns et quelques-unes dont les travaux et les idées ont plus particulièrement nourri mes réflexions : Philippe Grandjean, Roseline Bonnard, Edward O. Wilson, Denis Zmirou-Navier, Rémy Slama, Robert Barouki, William Dab, Philippe Hubert, Nathalie Bonvallot, Barbara Demeneix, Peter H. Kahn, Xavier Coumoul, Andreas Kortenkamp, Stephen R. Kellert, Ana Soto, Peter Gluckman, Mark Hanson, Philip Landrigan, Anne-Caroline Prévot. Si j'ai pu, à mon niveau, identifier quelques éléments qui m'ont paru intéressants dans mes recherches, c'est en ayant pu me tenir sur leurs épaules.

Je suis profondément reconnaissant à mes parents pour m’avoir donné l’opportunité de faire des études. C’était il y a plus de 20 ans maintenant, mais je vois cette thèse et les résultats associés comme d’autres fruits indirects de ces études, décalés dans le temps. Je remercie aussi mes parents pour leur soutien sans faille dans les moments difficiles.

Je souhaite également remercier mon frère pour son appui pendant mes années de formation, pour y avoir été une source d’inspiration en matière de capacité à l’effort et de solidité dans l'adversité.

Enfin, un grand merci, Hiromi, pour ton soutien, ta compréhension et tes conseils précieux. Je suis heureux à l’idée de te savoir à mes côtés.

Table des matières

Glossaire - Acronymes....9

Introduction....14

1. Parcours professionnel....18

2. Apports de la démarche ERS à l'élaboration de politiques publiques : études de cas....28

   A. Introduction et problématique générale de la thèse....28

   B. Hiérarchisation de substances préoccupantes : appui méthodologique à la priorisation de l'action publique....49

   C. Qualité de l'air intérieur : caractérisation des enjeux sanitaires liés à certains produits de consommation courante et amélioration de l'information des consommateurs....62

   D. Gestion des émissions des ICPE : fiabiliser l'évaluation des expositions pour les populations riveraines....80

   E. Gestion des sols pollués : encadrer l'usage de renaturation en maîtrisant les risques sanitaires....91

   F. Indépendance des organismes publics d'évaluation des risques sanitaires : fiabiliser les travaux d'expertise et contribuer à restaurer la confiance des parties prenantes....102

3. Perspectives de la thèse....110

   A. Synthèse des types d'apports issus des études de cas présentées....111

   B. Principales limites et axes de progrès identifiés....139

   C. Pistes pour de prochains éléments de réponse à construire - perspectives de contributions futures....149

Copies des travaux les plus importants....156

Références....261

Liste des figures

Figure 1 : Transition épidémiologique - illustration schématique.....29
Figure 2 : « Estimation du nombre de décès dans le monde par principal facteur de risque et par cause » [78].....30
Figure 3 : Potentiels effets décalés liés à une exposition pendant les 1000 premiers jours de vie 31
Figure 4 : Représentation graphique de l'exposome humain (Cauchemez et al. [116]).....33
Figure 5 : « Le territoire inconnu des risques chimiques » [117].....34
Figure 6 : Quotient de danger (QD) et Excès de risque individuel (ERI), pour les voies inhalation et ingestion [52].....41
Figure 7 : Schéma conceptuel générique pour le cas des ICPE, indiqué à titre d'illustration dans le guide Évaluation de l'état des milieux et des risques sanitaires (« guide ICPE ») [52].....42
Figure 8 : Continuum « sources - vecteurs – cibles » (SVC).....42
Figure 9 : Continuum SVC augmenté.....48
Figure 10 : Schéma présentant l'approche double retenue pour le processus de hiérarchisation de substances préoccupantes.....53
Figure 11 : Exemple d'un arbre ordonné de substances (« ordre de substances »), obtenu à l'aide d'une méthode multicritère.....55
Figure 12 : Illustration de liens possibles entre niveaux d'action et effets de substances toxiques 59
Figure 13 : Maison expérimentale MARIA du CSTB (Champs-sur-Marne) [187].....66
Figure 14 : Étiquetage d'information des désodorisants combustibles (décret n° 2017-946). 76
Figure 15 : Exemple de carte d'iso-risque [52].....78
Figure 16 : Exemples de formes de panaches différentes pour les dépôts atmosphériques (à gauche) et les concentrations dans l'air (à droite) pour une même substance.....83
Figure 17 : Représentation simplifiée des mécanismes de transfert multimédia vers un végétal, incluant l'absorption gazeuse [52].....84
Figure 18 : Illustration de l'articulation entre renaturations active et passive (modifié à partir de Jaunatre et al. 2012 [243] et Gallet 2024 [244]).....94
Figure 19 : Exemples d'illustrations de schémas conceptuels pour l'usage de renaturation dans la gestion des sites et sols pollués [56].....96
Figure 20 : Exemple d'une relation dose-réponse avec une forme « en U » (Lagarde et al. 2015) [320].....140
Figure 21 : Exemple d'une relation dose-réponse avec une forme « en cloche » (parfois aussi appelée « en U inversé ») (Anses 2019) [321].....141
Figure 22 : Exemple d'une courbe triphasique - Relation dose-mortalité de l'imidaclopride chez l'abeille. Adapté de Suchail et al. [322].....141

Liste des tableaux

Tableau 1 : « Blocs de compétences communs à l'ensemble des docteurs et liés à leur formation par la recherche » issus de l'Arrêté du 22 février 2019.....15
Tableau 2 : Deux points de vue multicritères identifiés avec des parties prenantes, lors de l'exercice de hiérarchisation préparant le troisième Plan national santé environnement (PNSE3).....54
Tableau 3 : Scénarios d'exposition génériques élaborés - exemple des utilisateurs de désodorisants non combustibles (sprays et diffuseurs).....65
Tableau 4 : Comparaison des expositions évaluées en fonction des produits testés - illustration avec l'exemple du formaldéhyde.....70
Tableau 5 : Usage de renaturation : potentielles expositions humaines associées [56].....97
Tableau 6 : Développement et renforcement des compétences communes aux docteurs…131

Glossaire - Acronymes

- **AASQA** : Association agréée de surveillance de la qualité de l'air
- **AC** : Autorité (d'expertise) compétente
- **ADAF** : de l'anglais *Age Dependent Adjustement Factor* : facteur d'ajustement lié à l'âge des personnes exposées
- **ADEME** : Agence de la transition écologique
- **AEE** : Agence européenne pour l'environnement
- **AFB** : Agence française pour la biodiversité, aujourd'hui intégrée à l'Office français de la biodiversité (OFB)
- **AFNOR** : Association française de normalisation
- **ALARA** : de l'anglais *As Low As Reasonably Achievable* : aussi bas que raisonnablement possible
- **AIR** : de l'allemand *Ausschuss für Innenraumrichtwerte* : Comité pour des valeurs guides d'air intérieur
- **AMM** : Autorisation de mise sur le marché
- **ANDès** : Association Nationale des Docteurs
- **Anses** : Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail
- **APC** : de l'anglais *Article Processing Charges* : frais de publication
- **ARB IdF** : Agence régionale de la biodiversité en Île-de-France
- **ARS** : Agence régionale de santé
- **AS** : À Seuil (effets)
- **ASN** : Autorité de sûreté nucléaire
- **ASNR** : Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection
- **ATSDR** : de l'anglais *Agency for Toxic Substances and Disease Registry* : Agence américaine des substances toxiques et du registre des maladies
- **B[a]P** : Benzo[a]pyrene
- **BATAEL** : de l'anglais *Best Available Techniques Associated Emission Level* : niveaux d'émission associés aux meilleures techniques disponibles (NEA-MTD)
- **BCF** : de l'anglais *Bioconcentration Factor* : facteur de bioconcentration
- **BPA** : Bisphénol A
- **BREF** : de l'anglais *Best available techniques REFerence document* : document de référence sur les meilleures techniques disponibles
- **BRGM** : Bureau de recherches géologiques et minières
- **BSE** : Bureau santé-environnement, aujourd'hui Bureau de l'appui aux politiques publiques (BAPP)
- **CEN** : Comité européen de normalisation
- **Cerema** : Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement
- **CFDE** : Centre de Formation du Développement durable et de l'Environnement
- **CGDD** : Commissariat général au développement durable
- **CGEDD** : Conseil général de l'environnement et du développement durable (aujourd'hui Inspection générale de l'environnement et du développement durable - IGEDD)
- **CI** : Concentration moyenne inhalée (exposition par inhalation)

- **CJC** : Confédération des jeunes chercheurs
- **CLI** : Concentration limite d'intérêt
- **CORE** : Commission d'orientation de la recherche et de l'expertise de l'Ineris
- **COSV** : composés organiques semi-volatils
- **CPP** : Comité de la prévention et de la précaution
- **CMR** : Cancérigène, mutagène, reprotoxique
- **Cnam** : Conservatoire national des arts et métiers
- **cnDAspe** : Commission nationale de la déontologie et des alertes en matière de santé publique et d'environnement
- **CNL** : Campagne nationale logements
- **CSPRT** : Conseil supérieur de prévention des risques technologiques
- **CSS** : Commission de suivi de site
- **CSTB** : Centre scientifique et technique du bâtiment
- **DALY** : de l'anglais *disability-adjusted life years* : années de vie en bonne santé perdues
- **DBP** : Phtalate de dibutyle
- **DDPP** : Direction départementale de la protection des populations
- **DDT** : Dichlorodiphényltrichloroéthane
- **DEDuCT** : de l'anglais *Database of Endocrine Disrupting Chemicals and their Toxicity profiles* : base de données sur les perturbateurs endocriniens et leurs profils de toxicité
- **DEHP** : Phtalate de di-2-éthylhexyle
- **DGPR** : Direction (ou directeur) général(e) de la prévention des risques
- **DGS** : Direction (ou directeur) général(e) de la santé
- **Dioxine Sev.** : 2,3,7,8-tétrachlorodibenzo-p-dioxine (dite « Dioxine de Sévéso »)
- **DJE** : Dose journalière d'exposition (exposition par ingestion)
- **DOHaD** : de l'anglais *Developmental Origins of Health and Disease* : origines développementales de la santé et des maladies
- **DPI** : Déclaration publique d'intérêt
- **DREAL** : Direction régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement
- **EBM** : de l'anglais *Evidence-Based Medicine* : médecine fondée sur les preuves
- **EDR** : Évaluation détaillée des risques
- **EFSA** : de anglais *European Food Safety Authority* : Autorité européenne de sécurité des aliments
- **EIES** : Études d'impact environnemental et social
- **ELR** : Environnement local de référence
- **ELT** : Environnement local témoin
- **EMA** : de anglais *European Medicines Agency* : Agence européenne des médicaments
- **EPIC** : Établissement public à caractère industriel et commercial
- **ERC** : (Séquence) « éviter, réduire, compenser »
- **ERE** : Évaluation des risques pour les écosystèmes
- **ERP** : Établissement recevant du public
- **ERS** : Évaluation des risques sanitaires
- **ERU** : Excès de risque unitaire
- **ESE** : Évaluation socio-économique
- **EUNIS** : de l'anglais *European Nature Information System* : Système européen d'information sur la nature

- **GD4H** : Green Data for Health - espace commun de données environnementales pour la santé
- **GSE** : Groupe Santé Environnement
- **GT** : Groupe de travail
- **HAL** : (Plateforme) Hyper Articles en Ligne
- **HCSP** : Haut Conseil de la santé publique
- **ICPE** : Installations classées pour la protection de l'environnement
- **IdP** : Indice de préoccupation
- **IEM** : Interprétation de l'état des milieux
- **IGAS** : Inspection générale des affaires sociales
- **IGEDD** : Inspection générale de l'environnement et du développement durable
- **IMPEL** : de l'anglais *European Union Network for the IMPlementation and Enforcement of Environmental Law* : Réseau de l'Union européenne pour l'application et le respect du droit de l'environnement
- **IMRaD** : de l'anglais *Introduction, Methods, Results, and Discussion* : Introduction, Méthodes, Résultats et Discussion (IMReD)
- **Ineris** : Institut national de l'environnement industriel et des risques
- **INRAE** : Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement
- **INSPQ** : Institut national de santé publique du Québec
- **InVS** : Institut de veille sanitaire (aujourd'hui intégré à Santé publique France (SpF))
- **IPBES** : de l'anglais *Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services* : Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques
- **IPS** : Indicateur de perception sociétale
- **IRC** : indicateur de risque collectif
- **IRGC** : de l'anglais *International Risk Governance Center* : Centre international sur la gouvernance des risques
- **IRSN** : Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (aujourd'hui intégré à l'Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection (ASNR))
- **ISES** : de l'anglais *International Society of Exposure Science* : Société internationale pour la science des expositions
- **ISIGE** : Institut supérieur d'ingénierie et de gestion de l'environnement
- **I-TEQ** : de l'anglais *International Toxic Equivalents* : équivalents toxiques internationaux
- **KISS** : de l'anglais *Keep it simple, stupid* (mot à mot « *garde ça simple, idiot* », dans le sens de « *ne complique pas les choses* »)
- **LCE** : Laboratoire de chimie de l'environnement
- **LI** : Lien d'intérêt
- **MAF** : de l'anglais *Mixture Assessment Factor* : facteur d'évaluation du mélange
- **MET** : Milieu écologique type
- **NEA-MTD** : niveaux d'émission associés aux meilleures techniques disponibles
- **NQ** : note de qualité
- **NRC** : de l'anglais *National Research Council* : Conseil national de la recherche américain
- **OCDE** : Organisation de coopération et de développement économiques
- **ODD** : Objectifs de développement durable
- **OEHHA** : de l'anglais *Office of Environmental Health Hazard Assessment* : Bureau américain pour l'évaluation des dangers en santé environnementale

- **OFB** : Office français de la biodiversité
- **OMS** : Organisation mondiale de la santé
- **ONG** : Organisation non gouvernementale
- **ONU** : Organisation des Nations unies
- **OQAI** : Observatoire de la qualité de l'air intérieur
- **ORS** : Observatoire régional de santé
- **PBT** : de l'anglais *Persistent, Bioaccumulative and Toxic substances* : substances persistantes, bioaccumulables et toxiques
- **PE** : Perturbateur endocrinien
- **PEC** : de l'anglais *Predicted Environmental Concentration* : concentration environnementale prédite
- **PNEC** : de l'anglais *Predicted No Effect Concentration* : concentration prédite sans effet
- **PNUE** : Programme des Nations unies pour l'environnement
- **PLU** : Plan local d'urbanisme
- **PM** : de l'anglais *Particulate Mater*, matière particulaire en suspension. Les PM_{10} sont les particules de diamètre inférieur à 10 µm. Les $PM_{2,5}$ sont les particules de diamètre inférieur à 2,5 µm
- **PNSE** : Plan national santé environnement
- **PP** : produits phytopharmaceutiques
- **PQAI** : Plan d'actions sur la qualité de l'air intérieur
- **PUF** : Particules ultrafines
- **QAI** : Qualité de l'air intérieur
- **QD** : Quotient de danger
- **RDNM** (relations) : Relations dose-réponse non-monotones
- **REACH** : de l'anglais *Registration, Evaluation, Authorization and restriction of CHemicals*, soit Enregistrement, évaluation, autorisation et restriction des substances chimiques : règlement européen en matière de substances chimiques
- **Risque chronique** : risque lié à une exposition d'intensité faible et de longue durée (supérieure à un an). On distingue souvent le risque chronique du risque accidentel, lié à une exposition de forte intensité sur une durée courte
- **RIVM** : du néerlandais *Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu* : Institut national de santé publique des Pays-Bas
- **Santé Canada** : Ministère Fédéral Canadien pour la Santé
- **Scénario d'exposition** : Ensemble de faits, de conditions et d'hypothèses qui définit une exposition dans une situation donnée, et qui est utilisé dans l'évaluation et la quantification de cette exposition. Un scénario d'exposition concerne les sources, les voies et milieux d'exposition, les vecteurs, les concentrations environnementales des agents en cause, l'organisme, le système ou la (sous-)population exposés.
- **SER** : de l'anglais *Society for Ecological Restoration* : Société pour la restauration écologique
- **SfN** : Solution fondée sur la nature
- **SIG** : Système d'information géographique
- **SNPE** : Stratégie nationale sur les perturbateurs endocriniens
- **SS** : Sans Seuil (effets)
- **SSP** : Sites et sols pollués
- **SVC** : (Schéma) « sources, vecteurs, cibles »

- **SVHC** : de l'anglais *Substances of Very High Concern* : substances extrêmement préoccupantes
- **SWOT** : de l'anglais *Strengths, Weaknesses, Opportunities, and Threats* : « forces », « faiblesses », « opportunités » et « menaces » (ici plutôt considérées comme des « problèmes à résoudre »)
- **UE** : Union européenne
- **UPDS** : Union des professionnels de la dépollution des sites
- **UPGE** : Union professionnelle du génie écologique
- **US-EPA** : de l'anglais *United States Environmental Protection Agency* : Agence américaine de protection de l'environnement
- **VAE** : Validation des acquis de l'expérience
- **VGAI** : Valeur guide de qualité d'air intérieur
- **VGR** : Valeur de gestion réglementaire
- **VLE** : Valeur limite d'émission
- **vPvB** : de l'anglais *very Persistent and very Bioaccumulative substances* : substances très persistantes et très bioaccumulables
- **VRAI** : Valeur repère d'aide à la gestion de la qualité de l'air intérieur
- **VTR** : Valeur toxicologique de référence
- **WECF** : Association Women Engage for a Common Future
- **WNT** : de l'anglais *Working Party of the National Coordinators for the Test Guidelines Programme* : Groupe de travail des coordinateurs nationaux du programme des lignes directrices pour les essais (OCDE)
- **WP** : de l'anglais *work package* : lot de travaux
- **WPEA** : de l'anglais *Working Party on Exposure Assessment* : Groupe de travail sur l'évaluation des expositions
- **WPHA** : de l'anglais *Working Party on Hazard Assessment* : Groupe de travail sur l'évaluation des dangers
- **ZAN** : Zéro artificialisation nette

Introduction

« Chacun a le droit de vivre dans un environnement équilibré et respectueux de la santé. »

Article 1 de la Charte de l'environnement, de valeur constitutionnelle [1]

Depuis 2010, je travaille à l'Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris), où je réalise des travaux d'expertise et de recherche appliquée dans le domaine de la santé environnementale.

À l'occasion des conférences de Francfort en 1989 et d'Helsinki en 1994, le bureau européen de l'Organisation mondiale de la santé (OMS) a défini la santé environnementale ainsi : « *La santé environnementale comprend les aspects de la santé humaine, y compris la qualité de la vie, qui sont déterminés par les facteurs physiques, chimiques, biologiques, sociaux, psychosociaux et esthétiques de notre environnement* » [2-6]. Plus simplement, la santé environnementale est le domaine qui étudie l'influence de l'environnement sur la santé. La notion d'environnement est ici considérée dans un sens très large, faisant écho à la définition d'« *exposition environnementale* » proposée par l'École des hautes études en santé publique (EHESP) dans son glossaire de référence [6] : « *Contact entre des organismes et des facteurs ou agents présents dans les milieux ou compartiments écologiques (atmosphère, aquifère, lithosphère ...) ou des environnements (urbains, ruraux, industriels, intérieurs voire sociaux...)* ». En complément, cette définition de la santé environnementale peut aussi être utilement éclairée par la définition que le préambule de la Constitution de l'OMS retient pour la santé en tant que telle : « *La santé est un état de complet bien-être physique, mental et social, et ne consiste pas seulement en une absence de maladie ou d'infirmité* » [7].

Mes travaux s'appuient notamment sur la démarche d'évaluation des risques sanitaires (ERS), que j'ai eu l'occasion de décliner et d'adapter dans différents contextes. Par exemple : amélioration de la qualité de l'air intérieur, maîtrise des émissions de sites industriels dans l'air et dans l'eau, usage de renaturation dans la gestion des sols pollués. Certains de ces travaux ont fait l'objet de publications dans des revues à comité de lecture ou ont été présentés dans des conférences internationales.

Dans le cadre d'une démarche de validation des acquis de l'expérience (VAE), je vise à obtenir le diplôme de doctorat, afin de faire reconnaître formellement les compétences de chercheur que j'ai pu développer au cours de mon parcours professionnel. Cette reconnaissance appuierait ma progression vers des fonctions à plus fortes responsabilités et, dès aujourd'hui, serait bien utile dans mes contextes de travail actuels. Par exemple : conférences scientifiques, consortiums répondant à des appels à projets de recherche, comités scientifiques d'organismes publics de référence (Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses), Haut Conseil de la santé publique (HCSP) et Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE)).

Cette démarche de VAE s'appuie sur la présente thèse, qui est structurée en trois parties principales.

1. Présentation de mon parcours professionnel

Cette partie vise à décrire le contexte et l'évolution dans lesquels s'inscrit cet objectif d'obtention d'un doctorat.

2. Présentation et analyse réflexive des principaux travaux menés jusqu'ici

Ces travaux sont mis en cohérence autour de la problématique générale de la thèse : « *Comment la démarche ERS peut-elle contribuer à l'élaboration de politiques publiques visant des environnements favorables à la santé ?* ». Cette problématique sera développée dans l'introduction de cette partie 2.

Ces présentations et analyses constitueront autant d'occasions de décrire certaines compétences de chercheur que j'ai pu mettre en œuvre au cours de ces travaux, en faisant référence aux « blocs » de compétences (Tableau 1) du référentiel défini par l'Arrêté du 22 février 2019 [8].

3. Perspectives

Cette partie discute des éléments de réponses qui ont pu être apportés à la problématique générale de la thèse - leurs apports, leurs limites, leurs améliorations possibles - puis, sur cette base, de potentiels futurs travaux susceptibles d'apporter des réponses complémentaires.

Tableau 1 : « Blocs de compétences communs à l'ensemble des docteurs et liés à leur formation par la recherche » issus de l'Arrêté du 22 février 2019

Bloc de compétences	**Description**
Bloc 1 : Conception et élaboration d'une démarche de recherche et développement, d'études et prospective (« Bloc 1 »)	• Disposer d'une expertise scientifique tant générale que spécifique d'un domaine de recherche et de travail déterminé. • Faire le point sur l'état et les limites des savoirs au sein d'un secteur d'activité déterminé, aux échelles locale, nationale et internationale. • Identifier et résoudre des problèmes complexes et nouveaux impliquant une pluralité de domaines, en mobilisant les connaissances et les savoir-faire les plus avancés. • Identifier les possibilités de ruptures conceptuelles et concevoir des axes d'innovation pour un secteur professionnel. • Apporter des contributions novatrices dans le cadre d'échanges de haut niveau, et dans des contextes internationaux. • S'adapter en permanence aux nécessités de recherche et d'innovation au sein d'un secteur professionnel.
Bloc 2 : Mise en œuvre d'une démarche de recherche et développement, d'études et prospective (« Bloc 2 »)	• Mettre en œuvre les méthodes et les outils de la recherche en lien avec l'innovation. • Mettre en œuvre les principes, outils et démarches d'évaluation des coûts et de financement d'une démarche d'innovation ou de R&D. • Garantir la validité des travaux ainsi que leur déontologie et leur confidentialité en mettant en œuvre les dispositifs de contrôle adaptés. • Gérer les contraintes temporelles des activités d'études, d'innovation ou de R&D.

Bloc de compétences	Description
	• Mettre en œuvre les facteurs d'engagement, de gestion des risques et d'autonomie nécessaire à la finalisation d'un projet R&D, d'études ou d'innovation.
Bloc 3 : Valorisation et transfert des résultats d'une démarche R&D, d'études et prospective (« Bloc 3 »)	• Mettre en œuvre les problématiques de transfert à des fins d'exploitation et valorisation des résultats ou des produits dans des secteurs économiques ou sociaux. • Respecter les règles de propriété intellectuelle ou industrielle liées à un secteur. • Respecter les principes de déontologie et d'éthique en relation avec l'intégrité des travaux et les impacts potentiels. • Mettre en œuvre l'ensemble des dispositifs de publication à l'échelle internationale permettant de valoriser les savoirs et connaissances nouvelles. • Mobiliser les techniques de communication de données en « open data » pour valoriser des démarches et résultats.
Bloc 4 : Veille scientifique et technologique à l'échelle internationale (« Bloc 4 »)	• Acquérir, synthétiser et analyser les données et informations scientifiques et technologiques d'avant-garde à l'échelle internationale. • Disposer d'une compréhension, d'un recul et d'un regard critique sur l'ensemble des informations de pointe disponibles. • Dépasser les frontières des données et du savoir disponibles par croisement avec différents champs de la connaissance ou autres secteurs professionnels. • Développer des réseaux de coopération scientifiques et professionnels à l'échelle internationale. • Disposer de la curiosité, de l'adaptabilité et de l'ouverture nécessaire pour se former et entretenir une culture générale et internationale de haut niveau.
Bloc 5 : Formation et diffusion de la culture scientifique et technique (« Bloc 5 »)	• Rendre compte et communiquer en plusieurs langues des travaux à caractère scientifique et technologique en direction de publics ou publications différents, à l'écrit comme à l'oral. • Enseigner et former des publics diversifiés à des concepts, outils et méthodes avancés. • S'adapter à un public varié pour communiquer et promouvoir des concepts et démarches d'avant-garde.
Bloc 6 : Encadrement d'équipes dédiées à des activités de recherche et développement, d'études et prospective (« Bloc 6 »)	• Animer et coordonner une équipe dans le cadre de tâches complexes ou interdisciplinaires. • Repérer les compétences manquantes au sein d'une équipe et participer au recrutement ou à la sollicitation de prestataires. • Construire les démarches nécessaires pour impulser l'esprit d'entrepreneuriat au sein d'une équipe. • Identifier les ressources clés pour une équipe et préparer les évolutions en termes de formation et de développement personnel. • Évaluer le travail des personnes et de l'équipe vis à vis des projets et objectifs.

NB : dans le cadre de ce manuscrit de thèse, l'auteur s'exprime à titre personnel, intuitu personae*, et ne vise à représenter aucun de ses organismes d'affiliation. Les points de vue exprimés ne reflètent pas nécessairement les décisions ou la politique déclarée de ces organismes. En particulier, les réflexions personnelles exprimées dans ce document n'engagent en rien l'Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris).*

De plus, la présence dans ce manuscrit de citations de gestionnaires des risques ou de documents de politiques publiques de gestion des risques ne présuppose aucune validation de la part des membres du jury.

1. Parcours professionnel

« L'obligation d'endurer nous donne le droit de savoir. Et le fait de savoir nous offre la possibilité du changement. »

Attribué à Jean Rostand [9]

Mon parcours professionnel s'étend maintenant sur un peu plus de 20 ans d'expérience, dans les domaines de l'environnement et de la santé au sens large. J'ai eu l'occasion de travailler dans différents types de structure - grand groupe privé ; cabinet de conseil ; établissement public - avec pour rôle général de réaliser des travaux d'études, d'expertise ou de recherche. Au fur et à mesure de mon parcours, les travaux que j'ai pilotés ou réalisés ont été associés à des enjeux de plus en plus élevés. Mon objectif transversal a été de produire des résultats qui contribuent à l'intérêt général, celui des humains et du vivant, dans une logique « Une seule santé » [10, 11].

Cette section vise à passer en revue les principales étapes de mon parcours professionnel et les principales missions qui m'ont été confiées, afin de présenter le contexte et l'évolution dans lesquels s'inscrit la démarche de VAE présentée dans cette thèse. Cette revue sera également l'occasion de mettre en avant le développement de certaines compétences associées à une personne détentrice d'un doctorat, au sens de l'Arrêté du 22 février 2019 (Tableau 1).

Et pour commencer, je souhaiterais présenter quelques éléments sur mon parcours d'étudiant.

Parcours d'étudiant

Au cours de mon enfance et de mon adolescence, j'ai eu la chance d'avoir régulièrement des « expériences de nature » [12-14] en compagnie de mes proches, dans les zones boisées et au bord des lacs se trouvant à proximité du domicile de mes parents.

De ces expériences à la fois simples et profondes, j'ai notamment gardé le ressenti d'un besoin de contacts réguliers avec des environnements de qualité - peu artificialisés et non pollués - et que ce ressenti était un besoin de base pour tous les êtres humains [15] ; je crois avoir aussi gardé une forme de devoir éthique spontané envers le monde vivant. Et assez logiquement, aussi loin que je puisse me rappeler, j'ai toujours voulu contribuer à préserver ou à promouvoir des environnements de qualité, à éviter ou à réduire l'apparition de nouvelles pollutions, ainsi qu'à protéger les personnes des pollutions résiduelles pouvant être dangereuses.

Cette logique a été le fil rouge de mon parcours d'étudiant :

- au lycée, mon conseiller d'orientation m'a présenté la voie scientifique conduisant à une école d'ingénieur comme « *la voie royale* » pour mes aspirations, ce qui m'a conduit à rentrer en classes préparatoires (Lycée Saint Louis, Paris) ;
- l'école d'ingénieurs que j'ai choisie (École nationale supérieure de techniques avancées - ENSTA, Paris) a été celle, parmi les écoles où j'ai été reçu, qui proposait les cours les

plus fournis en matière de gestion de l'environnement. Ainsi, à l'ENSTA, entre 2001 et 2004, j'ai notamment étudié la gestion des rejets industriels dans l'environnement, la modélisation de la pollution atmosphérique, les normes de la famille ISO 14000, l'hydrogéologie, l'hydroécologie des cours d'eau, la gestion et le traitement des déchets, le changement climatique, les transferts de pollutions dans les sols et dans les eaux souterraines, l'audit environnemental de sites industriels, l'écotoxicologie, l'économie de l'environnement, etc.

- une fois obtenu mon diplôme d'ingénieur généraliste, en 2004, j'ai souhaité approfondir ce premier niveau de spécialisation en gestion de l'environnement. J'ai donc suivi les cours de l'Institut Supérieur d'Ingénierie et de Gestion de l'Environnement (ISIGE - École des Mines de Paris) et obtenu le Mastère Spécialisé correspondant (Bac+6) en 2005.

Ce ressenti qu'un environnement de qualité est un besoin fondamental de l'être humain n'a pas diminué en intensité avec les années. Aussi, assez logiquement, il a donc été le principal fil rouge de mon parcours professionnel jusqu'à aujourd'hui.

Ingénieur Support technique Eau potable - Lyonnaise des Eaux

Pour mon premier poste, j'ai travaillé chez Lyonnaise des Eaux (aujourd'hui SUEZ Eau), entre 2005 et 2008. Au sein du centre régional Nord-Ardennes de distribution d'eau potable, à Anzin (59), mon rôle a consisté à apporter un support technique aux exploitants en charge de la production et de la distribution d'eau potable.

Ce poste a inclus les fonctions suivantes :

- pilotage du plan d'amélioration et de surveillance de la qualité des eaux : eaux brutes (avant traitement) et eaux distribuées par le centre régional ;
- responsable du laboratoire d'analyses ;
- réalisation d'audits techniques d'usines de production d'eau potable ;
- étude de la faisabilité et des coûts associés à des projets de traitements d'eaux brutes, suivie par la mise en place des traitements retenus ;
- mise en œuvre d'actions visant à augmenter le niveau de biodiversité présent sur des aires de protection de captages d'eaux souterraines, où les activités industrielles et agricoles sont très fortement limitées.

Cette expérience a été l'occasion de développer plusieurs compétences types associées aux diplômés du doctorat (Tableau 1). Par exemple :

- acquérir puis mettre en œuvre une expertise scientifique et technique (Bloc 1), en matière de traitement des eaux brutes et de qualité chimique et biologique des eaux distribuées. Cette expertise s'est notamment appuyée sur un bilan de l'état et des limites des connaissances existantes dans le centre régional, portant sur la qualité de l'eau dans le réseau de distribution et sur les besoins de traitement correspondants. De plus, la résolution des problèmes identifiés a nécessité de s'appuyer sur différents domaines de connaissances ; par exemple : hydraulique, chimie de l'eau, biologie, chimie des matériaux, toxicologie ;

- gérer les contraintes temporelles associées à la mise en œuvre des études (Bloc 2), le plus souvent avec un fort degré d'autonomie ;
- à chaque option de gestion ou traitement mis en place, mener à bien un programme de transfert de connaissances (Bloc 3) auprès des exploitants, dans l'objectif de les rendre techniquement familiers et autonomes le plus vite possible.

Au bout de trois ans environ, la direction du centre régional de Lyonnaise des eaux m'a informé qu'elle souhaitait fortement revoir le contenu de mes missions, afin que je puisse principalement me consacrer au pilotage de l'installation d'un réseau de télérelève des compteurs d'eau à l'échelle du Valenciennois. Ces nouvelles missions étant plus éloignées de mes aspirations à travailler pour la protection de la qualité des milieux environnementaux se trouvant au contact de la population générale, je me suis mis en recherche d'un autre emploi, plus en phase avec le parcours professionnel que je souhaitais.

Consultant en environnement, spécialisé dans la gestion des eaux - Cabinet ERM

J'ai travaillé ensuite chez Environmental Resources Management (ERM), entre 2008 et 2010, qui est un cabinet de conseil américain en environnement. Au sein du siège d'ERM à Paris (75), j'avais pour mission de réaliser des prestations de conseil et d'étude de différentes natures, en lien avec le thème de la gestion de l'environnement.

Les prestations que j'ai réalisées ou pilotées ont inclus les suivantes :

- études d'impact environnemental, en France, liées à des installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE), incluant de premières études des potentiels risques sanitaires pour les populations riveraines ;
- études d'impact environnemental et social (EIES) selon les principes de l'Équateur [16] qui constituent « *un référentiel du secteur financier pour la détermination, l'évaluation et la gestion des risques environnementaux et sociaux des projets* » [16] - pour des projets de développement à l'international : centrale hydroélectrique (Mali), mines de phosphates (Maroc) ;
- aide à la gestion d'une station d'épuration d'eaux usées industrielles (en détachement sur un site industriel du secteur pharmaceutique) ;
- appui technique à la mise en place d'un équipement de traitement d'eaux usées industrielles par évapo-concentration ;
- participation aux équipes-projets menant des diagnostics de sites et sols pollués (SSP).

Cette expérience a été l'occasion de développer ou de renforcer plusieurs compétences types associés aux diplômés du doctorat (Tableau 1). Par exemple :

- acquérir puis mettre en œuvre une expertise scientifique et technique (Bloc 1) dans le domaine des études d'impact environnemental, et avec un second niveau de maîtrise à ce stade, dans le domaine des études des risques sanitaires ;
- mettre en œuvre les facteurs d'engagement permettant de motiver les différents experts impliqués dans les études d'impact environnemental (Bloc 2), comme par exemple, des écologues, des hydrogéologues, des préleveurs dans les milieux environnementaux (air, eau, sol, végétaux), des spécialistes des odeurs ou des consultants en impact social ;

- développer des réseaux de coopération professionnels à l'échelle internationale (Bloc 4). En particulier, de nombreux appels d'offres incluait l'obligation d'intégrer un bureau d'études local dans les consortiums postulants, ce qui représentait une forte incitation pour ERM à créer et à entretenir un réseau de partenaires opérationnels à l'international ;
- former des étudiants (Executive Mastère Spécialisé Management global de la RSE et du Développement Durable ; Mines ParisTech - Groupe Cegos) sur le thème de la gestion des eaux en entreprise (Bloc 5) ;
- animer et coordonner une équipe dans le cadre de tâches interdisciplinaires (Bloc 6).

Après un peu plus de deux ans chez ERM, un recruteur m'a contacté à propos d'un poste d'ingénieur d'études et de recherche à l'Ineris, centré dans un premier temps sur une action phare du deuxième Plan national santé environnement (PNSE 2) [17]. La possibilité de continuer à travailler sur des sujets inspirants de santé-environnement et, cette fois-ci, de le faire dans le cadre d'une mission de service public, m'est apparue comme une très belle opportunité à saisir.

Ingénieur d'études et de recherche - Ineris

Hiérarchisation de substances préoccupantes

En 2010, j'ai donc intégré l'Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris), qui est un établissement public à caractère industriel et commercial (EPIC). À l'Ineris, j'ai été affecté à l'unité Impact sanitaire et exposition (ISAE), en tant que pilote d'un projet de hiérarchisation de substances préoccupantes. Ce projet visait à identifier les substances sur lesquelles il serait pertinent de concentrer prioritairement les futures politiques publiques de réduction des expositions de la population générale. Ce projet présentait donc de forts enjeux sociétaux et environnementaux, ce qui m'a amené à souvent travailler directement avec le Directeur des risques chroniques de l'Ineris de l'époque, Philippe Hubert, que je considère aujourd'hui, avec un peu plus de recul, comme un des meilleurs experts français en matière de santé environnementale. Le contenu de ces travaux et la valorisation associée sont présentés à la section 2.B, accompagnés d'une analyse réflexive.

Par ailleurs, la large pluridisciplinarité de ce projet m'a donné l'opportunité de piloter la Commission santé-environnement de l'Association française des ingénieurs et techniciens de l'environnement (AFITE), entre 2012 et 2014. Cette commission est un groupe de réflexion : des experts et des chercheurs viennent présenter leurs travaux et échanger avec les personnes présentes, dans l'objectif d'alimenter les réflexions visant à produire les analyses et les propositions de bonnes pratiques de la commission. Ces analyses et bonnes pratiques sont ensuite diffusées auprès des partenaires de l'AFITE : acteurs économiques, associations et pouvoirs publics.

Diversification de mes missions

Au fil du temps, mes missions au sein de l'unité ISAE se sont diversifiées, en lien avec le « trépied » de l'Ineris : il s'agit d'un ensemble de trois types d'activités - appui aux politiques publiques ; recherche appliquée ; services aux entreprises - qui met en cohérence et en synergie les différents travaux menés à l'Ineris. Par exemple, à mon niveau, j'ai pu :

- en matière de services aux entreprises, réaliser des études de risques sanitaires pour des exploitants d'ICPE, puis des tierces expertises de ce même type d'études, l'Ineris étant l'organisme public de référence dans ce domaine.
  En règle générale, les rapports d'études sont la propriété de l'entreprise pour laquelle ils ont été produits, et sont donc non publics. Néanmoins, certains rapports de tierce expertise sont issus d'une prescription administrative et ont donc été rendus publics [18-20], par exemple au travers d'une commission de suivi de site (CSS).
- en matière d'appui aux pouvoirs publics, mener à bien des études et des travaux d'expertise auprès du Bureau santé-environnement (BSE ; aujourd'hui Bureau de l'appui aux politiques publiques (BAPP)) de la direction générale de la Prévention des risques (DGPR, ministère chargé de l'Écologie), dans le domaine de la qualité de l'air intérieur. Plus particulièrement, ces travaux ont porté sur l'évaluation des expositions et des risques sanitaires liés à différents produits de consommation courante, faisant l'objet de préoccupations [21-23]. Par exemple : encens, bougies parfumées, produits ménagers.
  Au-delà de mes propres études, j'ai piloté l'ensemble du programme d'appui de l'Ineris auprès du BSE en matière d'environnements intérieurs (400 k€/an ; 2015-2020), incluant les travaux d'autres équipes de l'Ineris, portant sur des thèmes variés. Par exemple : qualité de l'air dans certains établissements recevant du public (ERP), dans des habitacles de transport, dans les enceintes ferroviaires souterraines, ou encore dans les domiciles riverains d'entreprises polluantes en ville (installations de nettoyage à sec, imprimeries, ateliers de réparation de deux roues, etc.).
  J'ai également eu l'opportunité de jouer un rôle de conseiller scientifique auprès du BSE, en matière de risques sanitaires, dans différents contextes. Par exemple :
  - élaboration de normes portant sur la mesure des émissions de certains produits de consommation courante, en France avec l'Association française de normalisation (AFNOR - commission de normalisation D90G) [24-26] et à l'international avec le Comité européen de normalisation (CEN - Technical Committee TC 421) [27-29] ;
  - négociations avec des représentants de fabricants de produits de consommation (meubles, encens, bougies parfumées, etc.) concernant la mise en place d'un étiquetage portant sur les niveaux d'émissions en polluants volatils, dans le cadre des lois post Grenelle de l'environnement [30] et du Plan d'actions national sur la qualité de l'air intérieur (PQAI) [31] ;
  - refonte et développement d'un « guide pratique » pour améliorer la qualité de l'air intérieur dans les lieux accueillant des enfants et adolescents [32].
- enfin, en matière de recherche, le développement de mes compétences dans le domaine de la qualité de l'air intérieur m'a amené à rencontrer puis à collaborer avec certains chercheurs du domaine [33-36], notamment des chercheurs travaillant à l'Ineris, au Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB) et au Laboratoire de chimie de l'environnement (LCE, Université d'Aix-Marseille).
  Ces travaux ont été présentés lors de journées techniques nationales (Rencontres scientifiques « Recherche sur l'air » (Ademe-Anses), colloques de restitution des projets de recherche PRIMEQUAL et CORTEA (Ademe), Assises nationales de la qualité de l'air (Ademe - ministère chargé de l'Écologie) et, à trois reprises (2016, 2018, 2020), lors de l'*International Conference on Indoor Air Quality and Climate* (dite conférence

« Indoor Air ») [37-39], la conférence internationale de référence dans le domaine de la qualité de l'air intérieur.
Ces travaux ont fait l'objet de plusieurs articles scientifiques [40-43]. Deux de ces articles ont été publiés dans des revues internationales à comité de lecture [41, 42] : ils sont présentés et analysés à la section 2.C.

En parallèle, les publications et les présentations de ces travaux m'ont conduit à être sollicité par des journaux scientifiques, pour évaluer (« évaluation par les pairs ») des articles qui leur étaient soumis. Ainsi, j'ai également pu participer au système de revue par les pairs, pour les journaux et organismes suivants : Indoor Air, Bulletin épidémiologique hebdomadaire (BEH) de Santé publique France ; Environnement, Risques & Santé ; YearBook Santé et Environnement ; Food and Chemical Toxicology ; Bulletin du Réseau Recherche Santé Environnement Intérieur (RSEIN) ; Fondation Santé Environnement de la Mutuelle Familiale.

Enfin, depuis 2023, je fais partie du comité scientifique du YearBook Santé et Environnement [44] associé de la revue Environnement, Risques & Santé, la revue francophone de référence dans le domaine de la santé environnementale.

Bénévolat auprès de la Commission nationale de déontologie

En complément de mes activités professionnelles à l'Ineris, j'ai eu l'occasion de travailler bénévolement pour la Commission nationale de la déontologie et des alertes en matière de santé publique et d'environnement (cnDAspe) [45], couramment appelée « Commission nationale de déontologie » depuis que le périmètre de ses missions d'alerte a été significativement réduit en 2022 [46]. Dans les domaines de la santé et de l'environnement, la cnDAspe a notamment pour mission d'« *accompagner les organismes publics d'expertise scientifique et technique dans l'amélioration de leurs pratiques en termes de déontologie et d'ouverture à la société civile. […] À cette fin, elle émet des recommandations générales sur les principes déontologiques, elle est consultée sur les codes de déontologie des organismes publics concernés et est destinataire du rapport annuel de leur comité de déontologie.* ». La Commission peut également s'autosaisir [47].

Au sein de « formations spécifiques » (l'équivalent de groupes de travail dans d'autres contextes) rapportant à la cnDAspe, j'ai notamment eu l'opportunité de travailler sur deux sujets à forts enjeux :

- les préoccupations d'ordre déontologique associées au projet de fusion entre l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) et l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) - qui a donné lieu en 2025 à la création de l'Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection (ASNR). Ce travail a notamment porté sur les liens entre gestion des risques, expertise et recherche [48] ;
- la gestion des liens d'intérêts dans les organismes publics chargés des évaluations des risques sanitaires avant la mise sur le marché de produits phytopharmaceutiques [49, 50].
  Ce travail a duré environ deux ans (2022-2023) et a été valorisé par un article scientifique [51] - publié dans une revue internationale à comité de lecture – qui est présenté et analysé à la section 2.F.

Missions actuelles

Suite à plusieurs baisses significatives de la subvention de fonctionnement versée par l'État (ministère chargé de l'Écologie), l'Ineris a procédé à une « revue de ses missions » en 2021. Dans un contexte budgétaire contraint, l'objectif était de recentrer les activités de l'Ineris sur son cœur de métier historique, à savoir l'étude et la maîtrise des risques liés aux activités industrielles pour les personnes, les biens et l'environnement.

Cette revue a conduit à l'arrêt des activités portant sur la qualité de l'air intérieur à l'Ineris, lorsqu'elles n'étaient pas directement liées à des activités industrielles. En particulier, les activités liées aux produits de consommation courante et aux ERP n'ont pas été poursuivies.

Dans ce contexte, mes missions sont aujourd'hui centrées sur trois principales thématiques :

- les études des potentiels effets sanitaires liés aux ICPE, avec l'objectif de devenir un expert technique référent au niveau national.
  Il s'agit de réaliser de nouvelles études, de tierce-expertiser des études existantes et d'appuyer le ministère chargé de l'Écologie dans le développement et l'amélioration des méthodes de référence [52] pour réaliser ce type d'études en France.
  Certaines propositions d'amélioration ont fait l'objet de la rédaction d'un article scientifique, en phase de soumission à la date de rédaction du présent manuscrit et présenté à la section 2.D ;
- la formation à ces méthodes de référence, pour différents types d'acteurs du domaine des ICPE. Par exemple : inspecteurs des directions régionales de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DREAL), qui assurent l'inspection de la majorité des ICPE, et des directions départementales de la protection des populations (DDPP), qui assurent notamment l'inspection des élevages industriels et des équarrissages, ces deux directions faisant partie de la police de l'environnement ; bureaux d'études ; étudiants du Conservatoire national des arts et métiers (Cnam) ; agents de l'ASNR, du ministère chargé de l'Écologie et des agences régionales de santé (ARS), ces dernières ayant notamment pour mission de « *renforcer la police sanitaire et le contrôle de la réglementation sanitaire pour réduire les conséquences des pollutions sur la santé humaine [et d']informer les élus, les différents responsables et la population, des risques sanitaires liés aux pollutions ou aux comportements, de façon à faire prendre les mesures de gestion nécessaires et faire évoluer les pratiques individuelles* » [53].
  En complément des aspects techniques, les compétences de formateur développées avec les années ont été appuyées par des formations de formateurs, reconnues formellement avec la certification ELEGIA formation[1] ;
- la renaturation des sols pollués.
  Depuis le 1er janvier 2023, la renaturation fait partie des types d'usages réglementaires pour la gestion des sites et sols pollués [54]. La mise en œuvre de ce nouvel usage a besoin d'être appuyée et encadrée par une méthode de référence à l'échelle nationale, incluant différents aspects : démarche, objectifs, référentiels, indicateurs, intégration dans le cadre national de gestion des sites et sols pollués [55].
  L'élaboration de cette méthode a été confiée à l'Ineris par le ministère chargé de l'Écologie. Une première proposition de méthode de référence a été élaborée [56] et

[1] Aujourd'hui Lefebvre Dalloz Compétences

présentée à la *11th World Conference on Ecological Restoration* (SER2025) [57]. Cette proposition est décrite et analysée à la section 2.E.

En parallèle de ces missions principales, je participe à des expertises collectives, réalisées dans des comités d'experts au sein d'organismes publics de référence :

- Comité d'experts spécialisé « Évaluation des risques chimiques liés aux articles et produits de consommation » (CES CONSO) [58] de l'Anses, depuis 2021 ;
- Working Party on Exposure Assessment (WPEA) [59] de l'OCDE, depuis 2023 ;
- Commission spécialisée « Risques liés à l'environnement » (CsRE) [60] du HCSP, depuis 2024.

Je participe également aux travaux de groupes de travail (GT) rapportant à ces comités d'expert. Ces GT peuvent être temporaires - comme le GT Catégorisation des produits ménagers du CES CONSO [61], dont les travaux ont eu lieu entre 2022 et 2024 – ou permanents - comme le GT Qualité de l'air de la CSRE [62, 63] ou le GT *Compilation of Exposure Models Used in a Regulatory Context* de la WPEA [64].

Développement de compétences de chercheur

En analysant le bilan de mon activité au sein de l'Ineris, il apparaît que les actions que j'ai pu conduire m'ont permis de développer ou de renforcer plusieurs compétences types associées aux diplômés du doctorat (Tableau 1). Par exemple :

- acquérir puis mettre en œuvre une expertise scientifique et technique (Bloc 1) dans le domaine de l'évaluation des risques sanitaires, incluant un bilan de l'état des limites et des savoirs à l'échelle nationale et à l'échelle des sites étudiés ;
- concevoir des axes d'innovation (Bloc 1) pour améliorer la méthode de référence des études de risques sanitaires des ICPE et ses déclinaisons pratiques ;
- apporter des contributions novatrices dans le cadre d'échanges de haut niveau, et dans des contextes internationaux (Bloc 1). Par exemple : échanges avec les scientifiques de référence du domaine de la qualité intérieure lors de conférences internationales, sur la base d'études apportant des connaissances nouvelles dans la littérature scientifique ;
- mettre en œuvre une démarche de recherche et développement, d'études et prospective (Bloc 2), au travers des différentes études (ICPE) et travaux de recherche (QAI) effectués, notamment en gérant les contraintes temporelles associées (Bloc 2), et en garantissant leur déontologie en mettant en œuvre les dispositifs de contrôle adaptés (Bloc 2) - par exemple, en appliquant la grille de critères présentée à la section 2.F ;
- mettre en œuvre des dispositifs de publication à l'échelle internationale (articles scientifiques dans des revues se trouvant dans le premier quartile de leur domaine ; présentations orales dans des conférences internationales de référence) permettant de valoriser les savoirs et connaissances nouvelles (Bloc 3) ;
- mobiliser des techniques de communication de données en « open data » pour valoriser des démarches et résultats (Bloc 3) : les post-prints de mes articles sont disponibles sous la plateforme de référence Hyper Articles en Ligne (HAL) ;

- acquérir, synthétiser et analyser les données et informations scientifiques à l'échelle internationale, avec un regard critique, notamment à l'occasion de la rédaction d'articles scientifiques (Bloc 4) ;
- développer des réseaux de coopération scientifiques et professionnels à l'échelle internationale (Bloc 4), notamment avec les travaux menés dans le cadre de la WPEA de l'OCDE ;
- rendre compte et communiquer des travaux à caractère scientifique, en français et anglais, à l'écrit comme à l'oral (Bloc 5) ;
- enseigner et former des publics diversifiés à des concepts, outils et méthodes avancés (Bloc 5). Par exemple : inspecteurs, étudiants, ingénieurs sanitaires.
- piloter des travaux de recherche et des études, incluant différents acteurs et présentant une pluralité de disciplines (Bloc 6).
  Par exemple, un projet d'étude de potentiels effets sanitaires liés à la contamination de l'environnement par une ICPE, ou par un produit de consommation, ou encore par un équipement domestique comme des poêles à bois, inclut généralement le travail collectif d'un groupe pluridisciplinaire de spécialistes et d'organismes. Par exemple : toxicologues, modélisateurs, préleveurs, laboratoires d'analyses, spécialistes des équipements ou des procédés étudiés et des meilleures techniques disponibles (MTD) associées, pilotes d'installations de modélisation à échelle réduite (ex : chambre d'émissions) ou à échelle réelle (ex : maison expérimentale), etc.
- évaluer le travail des personnes et de l'équipe-projet vis à vis des objectifs des travaux et des résultats obtenus (Bloc 6).

Bilan - motivations pour obtenir un doctorat

Après deux premières expériences dans le secteur privé, en tant qu'ingénieur Eau Potable chez Lyonnaise des Eaux (SUEZ Eau) puis en tant que consultant en Environnement chez ERM, j'ai intégré l'Ineris en 2010. Depuis lors, j'ai travaillé sur des thèmes variés - hiérarchisation de substances préoccupantes, études d'impact environnemental des ICPE, qualité de l'air intérieur, renaturation des sols pollués, gestion des liens d'intérêt dans des organismes d'évaluation des risques, etc. - selon les trois composantes du trépied qui constitue le socle du fonctionnement de l'Ineris : expertise, services et recherche. La plupart de ces travaux se sont appuyés sur la démarche ERS, que je présenterai plus avant dans la partie suivante.

Les travaux de recherche que j'ai pu mener m'ont conduit à exercer certaines activités classiques d'un chercheur - pilotage d'équipes-projet, bilan et analyse critique du contenu de la littérature scientifique, définition et mise en place d'un protocole, présentation des résultats obtenus dans des conférences en France et à l'international, publication d'articles scientifiques, transmission de connaissances, collaboration avec des scientifiques d'autres pays, etc. - et à développer les compétences correspondantes.

Au fil de ce parcours, mes contextes de travail ont significativement évolué. Aujourd'hui, autour de moi, avoir une thèse me paraît faire partie du minimum attendu, des codes implicites, des points de repères sur lesquels on s'appuie pour se faire un avis sur un expert ou sur un scientifique en première approche. Il me semble que, sans thèse, je pars souvent « avec des points en moins », en quelque sorte, dans les relations professionnelles que j'initie ou dans les candidatures que je peux proposer.

Ma première motivation pour obtenir un doctorat est donc un besoin de reconnaissance accrue dans ces nouveaux contextes, un besoin d'améliorer mon expertise perçue. Dans mon environnement professionnel d'aujourd'hui, lors de conférences internationales, au sein de comités d'experts ou encore au sein de consortiums répondant à des appels à projets de recherche, je constate, plus ou moins explicitement, qu'il est attendu que j'ai un « PhD ». Un diplôme de doctorat me permettrait donc de faire reconnaître formellement les compétences de chercheurs que j'ai pu développer dans mon parcours professionnel.

Ma deuxième motivation est d'ordre intellectuel. J'ai été motivé à l'idée de faire un pas de côté, de consacrer un vrai temps pour prendre du recul sur le travail réalisé jusqu'ici, de le mettre en cohérence pour ainsi mieux me projeter dans la deuxième partie de ma vie professionnelle, pour mieux identifier ce que je peux apporter par la suite aux enjeux qui me sont chers.

Enfin, rédiger une thèse m'est apparu être une bonne opportunité d'approfondir la mise en œuvre d'une démarche scientifique, en interaction avec un directeur de recherche expérimenté.

La partie 2 ci-après présente, dans un premier temps, la problématique générale de la thèse, celle autour de laquelle s'articuleront les présentations détaillées des différents travaux que j'ai pu mener. Dans un deuxième temps, ces travaux seront présentés individuellement et analysés de manière réflexive, afin d'identifier les éléments de réponse que chacun apporte à la problématique générale de la thèse. Enfin, la partie 3 synthétisera ces apports, discutera des limites et des axes de progrès identifiés, puis proposera des pistes pour la production future de nouveaux éléments de réponse.

2. Apports de la démarche ERS à l'élaboration de politiques publiques : études de cas

A. Introduction et problématique générale de la thèse

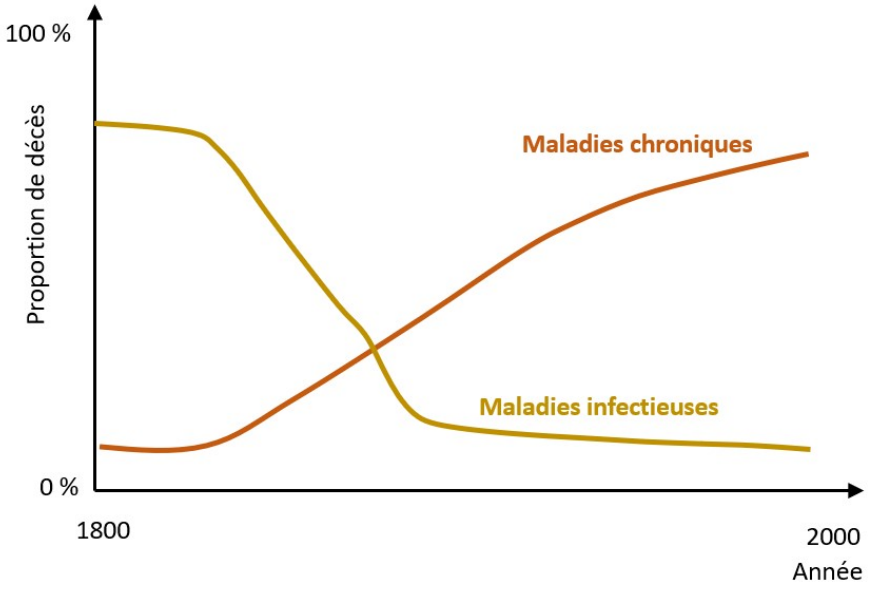
« *Environnement d'aujourd'hui, santé de demain.* »

Organisation mondiale de la santé (OMS) [2]

A.1. Ampleur des enjeux sanitaires en santé environnementale

Impact sanitaire connu des pollutions environnementales

Jusqu'au XIXe siècle, la majorité des causes de décès étaient liées à des maladies infectieuses (virus, bactéries…) [65]. Aujourd'hui, ces causes sont minoritaires dans les pays développés : les principales causes de décès y sont aujourd'hui les cancers, les maladies cardiovasculaires et les maladies neurodégénératives [66], c'est-à-dire des maladies couramment qualifiées de « chroniques » ou de « non-transmissibles ». Cette évolution est appelée « transition épidémiologique » (Figure 1).



D'après Slama R. Relations entre santé humaine et environnement dans l'Anthropocène. Collège de France, 2022.

Figure 1 : Transition épidémiologique - illustration schématique

Concernant les principales maladies chroniques, des travaux montrent des liens avec des facteurs environnementaux, les niveaux de preuves disponibles étant variables en fonction des maladies et des facteurs considérés. Pour les polluants les mieux étudiés, un impact sanitaire peut être spécifiquement quantifié. Par exemple, une expertise européenne [67], datée de 2019 et mise en avant par l'Agence européenne de l'environnement (AEE) [68], a porté sur l'exposition des enfants à sept facteurs environnementaux : particules dans l'air (PM_{10} et $PM_{2.5}$), ozone, fumée de tabac secondaire, moisissures, plomb et formaldéhyde. Cette étude a conclu, pour les enfants européens au global, à une perte de 211 000 années de vie en bonne santé, chaque année.

Les quantifications d'impact sanitaire peuvent aussi porter sur la population générale. Par exemple, en France :

- de 40 à 70 000 décès par an sont attribués à la pollution de l'air extérieur, selon Santé publique France [69] et la Société européenne de cardiologie [70] ;
- pour l'air intérieur, en retenant six substances parmi la « *multitude de polluants dans l'air intérieur* » [71], l'Anses estime que l'impact sanitaire annuel est d'environ 20 000 décès et 30 000 pathologies [71, 72]. Par exemple : cancers, maladies cardiovasculaires, accidents vasculaires cérébraux (AVC), etc.
- d'après l'OMS [73, 74], les facteurs environnementaux sont directement responsables d'environ 14 % de la mortalité en France, soit environ 75 000 décès par an [75]. Au niveau européen, cette proportion est du même ordre de grandeur (13 % - 630 000 décès par an ; soit le même ordre de grandeur que la mortalité totale en France (610 000 décès en 2019)) [68, 76, 77].

Au niveau mondial, selon la Lancet Commission on pollution and health [78], « *la pollution est la principale cause environnementale de maladie et de décès prématuré dans le monde aujourd'hui. Les maladies causées par la pollution ont été responsables d'environ 9 millions de décès prématurés en 2015 - 16 % de tous les décès dans le monde -, soit trois fois plus que les*

décès dus au sida, à la tuberculose et au paludisme réunis, et 15 fois plus que les décès dus à toutes les guerres et autres formes de violence » (Figure 2).

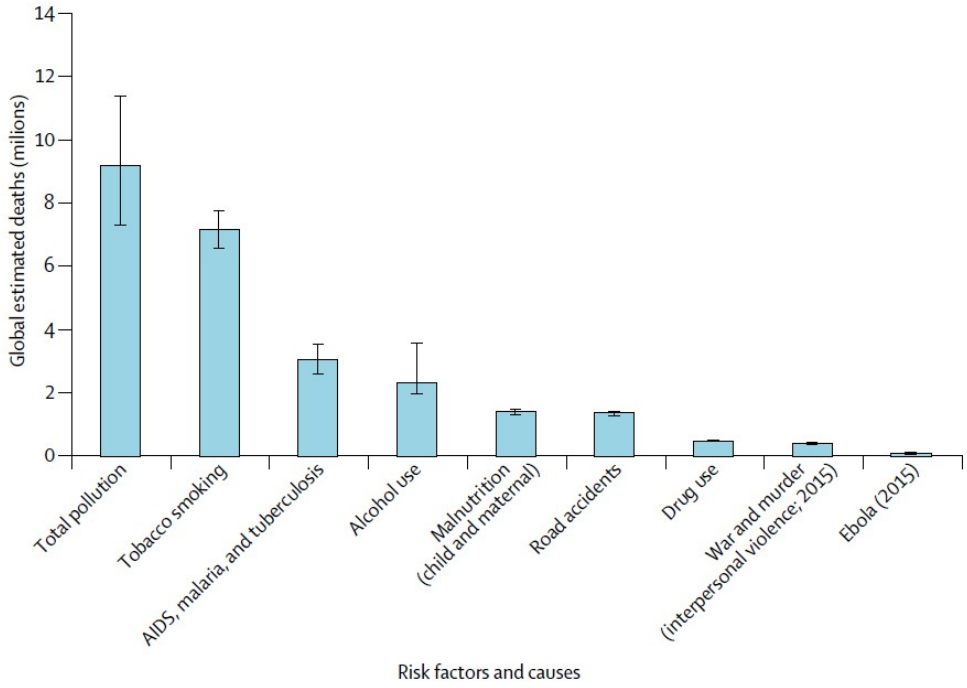


Figure 2 : « Estimation du nombre de décès dans le monde par principal facteur de risque et par cause » [78]

Ces quantifications sont des exercices complexes fondés sur des modélisations et associés à de nombreuses limites et incertitudes [65]. La connaissance imparfaite des expositions et des mécanismes de toxicité impliqués [78-80] laisse à penser que les quantifications d'impact disponibles sous-estiment probablement l'impact réel des pollutions environnementales [76].

Néanmoins, les ordres de grandeur associés suggèrent que, comme le formule Santé publique France, « *la santé environnementale est un enjeu majeur de santé publique* » [81]. Et en matière de santé publique, comme le rappelle le PNSE 2 dans son introduction, « *malgré les incertitudes sur leur impact quantitatif, des actions sont nécessaires afin de réduire les impacts sur la santé des dégradations de notre environnement* » [17].

Populations sensibles

Si les pollutions environnementales sont associées à un fort impact sanitaire pour la population générale, certaines populations peuvent, en outre, présenter des sensibilités spécifiques. En d'autres termes, pour une même exposition, les effets sanitaires peuvent être plus élevés pour ces populations.

En santé environnementale, la notion de « vulnérabilité » correspond à des caractéristiques individuelles (âge, sexe, certaines caractéristiques génétiques, présence de maladies particulières), sociales (genre, statut socio-économique, identité ethnoculturelle) ou environnementales (régions et écosystèmes, accès aux ressources naturelles, climat) [82], qui

sont associées à des risques augmentés. Quand ces caractéristiques sont communes dans un groupe d'individus, on parle de « population vulnérable » [83].

Un des cas les plus étudiés est celui des jeunes enfants [84-86], avec notamment une formule iconique de l'OMS : « *les enfants ne sont pas de petits adultes* » [87]. En particulier, la période des « 1000 premiers jours », allant de la conception jusqu'à l'âge de deux ans environ [88], présente des « fenêtres de vulnérabilité » : il s'agit de périodes où de faibles expositions à des substances toxiques peuvent conduire à des effets sanitaires graves et irréversibles.

Ces effets peuvent apparaître de manière décalée dans le temps (Figure 3), pendant l'enfance, plus tard dans la vie adolescente ou adulte, et même potentiellement chez les générations suivantes [89-91]. Ceci fait écho au concept des origines développementales de la santé et des maladies (DOHaD, de l'anglais *Developmental Origins of Health and Disease*) [92-95].

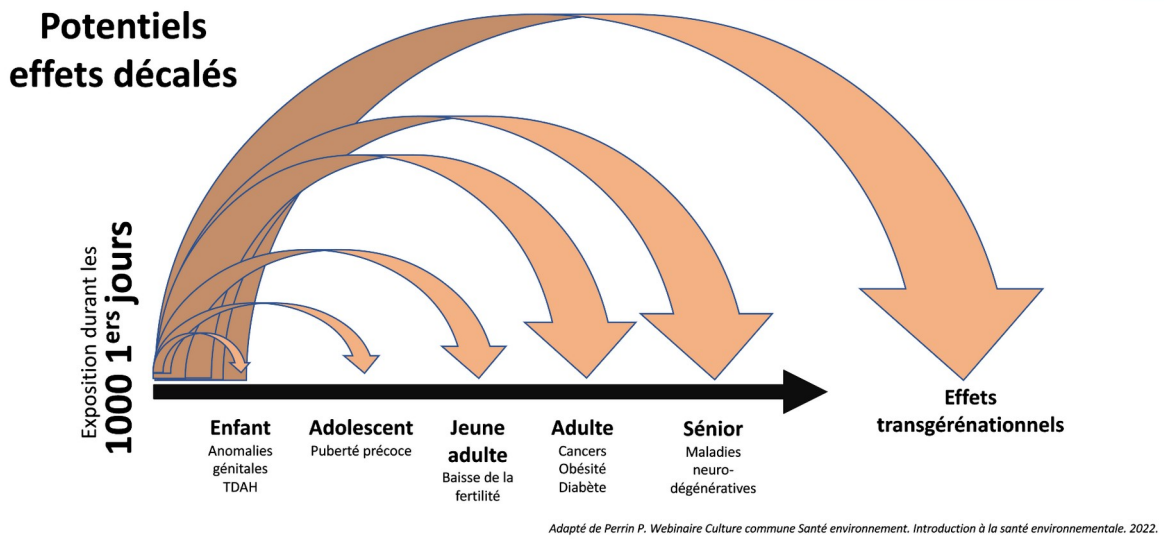


Figure 3 : Potentiels effets décalés liés à une exposition pendant les 1000 premiers jours de vie

Une exposition précoce peut conduire à des effets sanitaires retardés, à différents moments de la vie, et possiblement aussi chez la descendance.

L'Endocrine Society souligne : « *Les perturbateurs endocriniens peuvent […] agir sur plusieurs générations simultanément. Par exemple, l'exposition des femmes enceintes aux perturbateurs endocriniens peut agir sur la femme enceinte, son fœtus et les gamètes fœtaux, affectant trois générations. Les personnes exposées aux perturbateurs endocriniens dans l'utérus courent un risque accru de maladie plus tard dans la vie, et certains perturbateurs endocriniens ont des effets multigénérationnels* » [96]. En particulier, en cas de perturbation de processus du développement de l'organisme, le fonctionnement de certains organes et de certains systèmes corporels peut se retrouver altéré, parfois de façon pérenne. Les principales préoccupations portent notamment sur le cerveau, le système immunitaire et les organes reproducteurs. Ici aussi, on trouve une formule iconique : « *only one chance* » [97]. Par exemple, si une étape de la construction d'une zone du cerveau a été perturbée par l'exposition à une substance toxique, il n'y aura pas de seconde possibilité : les fonctions cérébrales pourront être

significativement altérées pour le reste de la vie, avec notamment de potentiels effets néfastes sur les capacités intellectuelles ou sur le comportement [97-99].

Le cas du diéthylstilbestrol (DES), plus connu sous le nom commercial de « Distilbène », est une illustration classique de cette vulnérabilité des premières années et des potentiels effets décalés associés [100]. Le DES est un médicament qui a été utilisé chez la femme enceinte entre les années 1950 et 1970, dans l'objectif de réduire le risque de fausse couche. Son utilisation a induit l'apparition de cas d'adénocarcinome à cellules claires du vagin (un type de cancer qui apparaît généralement chez des femmes ayant plus de 50 ans) chez des jeunes femmes plus de quinze ans après leur exposition *in utero*, alors que la substance avait depuis longtemps disparu de leur organisme. Le risque de malformation des organes génitaux chez les garçons nés d'une mère exposée *in utero* pourrait également être augmenté [101-104].

Encore beaucoup à comprendre

La définition de la santé environnementale, explicitée en introduction de cette thèse, correspond à un champ d'études large et complexe. Dans ce contexte, le terme « exposome » a été proposé en 2005 [105] - en référence au génome - afin d'englober l'ensemble des expositions environnementales d'un individu au cours de sa vie (Figure 4). L'exposome considère notamment les interactions entre toutes ces expositions, dans l'objectif de dépasser la logique des études substance par substance, ou source par source, ou encore voie d'exposition par voie d'exposition [106, 107]. L'étude de l'exposome est plus difficile que celle du génome, notamment car l'exposome ne se fonde pas sur un support unique, car il est variable dans le temps et car les prélèvements et analyses biologiques actuels ne permettent de le caractériser que très partiellement [65]. En particulier, la complexité et les incertitudes associées à la partie chimique de l'exposome augmentent au fur et à mesure de la production de nouvelles substances, notamment au regard de la capacité limitée des organismes chargés d'en évaluer les risques pour les maîtriser. Afin d'illustrer cet enjeu, l'AEE a produit une infographie (reprise par la Commission européenne dans sa stratégie de 2020 sur la gestion des produits chimiques [108]) qui me semble bien éclairer la situation, avec un titre assez explicite : « *Le territoire inconnu des risques chimiques* » (Figure 5). Sur environ 100 000 substances présentes sur le marché européen, on dispose d'un large ensemble de données pour environ 500 substances - soit moins de 1 % - et on connait très peu les risques d'environ 70 000 substances. On est donc loin de tout connaitre (d'autant plus si on considère, en complément, que certaines substances peuvent avoir des effets à des niveaux de contamination des milieux d'exposition se trouvant sous les limites de détection (LD) et de quantification (LQ) des méthodes analytiques disponibles à ce stade) : l'iceberg correspondant à ces estimations est en réalité bien plus disproportionné que l'iceberg représenté sur l'infographie de la Figure 5.

En parallèle, d'après une estimation de la Commission européenne datée de 2020, la production mondiale de produits chimiques devrait doubler d'ici à 2030 [108, 109]. De plus, le nombre de nouvelles substances entrant sur le marché mondial a pu être estimé à environ 1 000 par an [75, 110], chiffre qui ne tient pas compte des substances dérivées (dont les métabolites) qui peuvent être obtenues par des transformations bio-physico-chimiques dans l'environnement. Plus généralement, à la date de rédaction de cette thèse, le registre *Chemical Abstract Services* (CAS) contient environ 290 millions de substances [111], soit plus du double par rapport à 2017 (131 millions de substances [112]). Enfin, la Commission européenne a

souligné en 2018 que « *l'insuffisance des moyens freine les activités [d'évaluation]. Le nombre de substances effectivement évaluées et réglementées s'en trouve réduit, et le processus ralenti* » [113, 114]. Ce constat est souligné alors que, concernant les risques sanitaires des substances chimiques, les informations fournies par les fabricants industriels sont souvent de faible qualité [68, 76, 115]. Et puisque la réglementation européenne est généralement considérée comme la réglementation la plus exigeante au monde, on comprend bien qu'il reste encore beaucoup à connaître sur les effets des substances produites, et que les quantifications d'impact sanitaire actuelles sous-estiment très probablement la complexité et l'ampleur des enjeux pour la société. Au regard de ces forts enjeux sanitaires, la protection de la population générale requière l'élaboration de politiques publiques efficaces, visant notamment à réduire les expositions les plus préoccupantes.

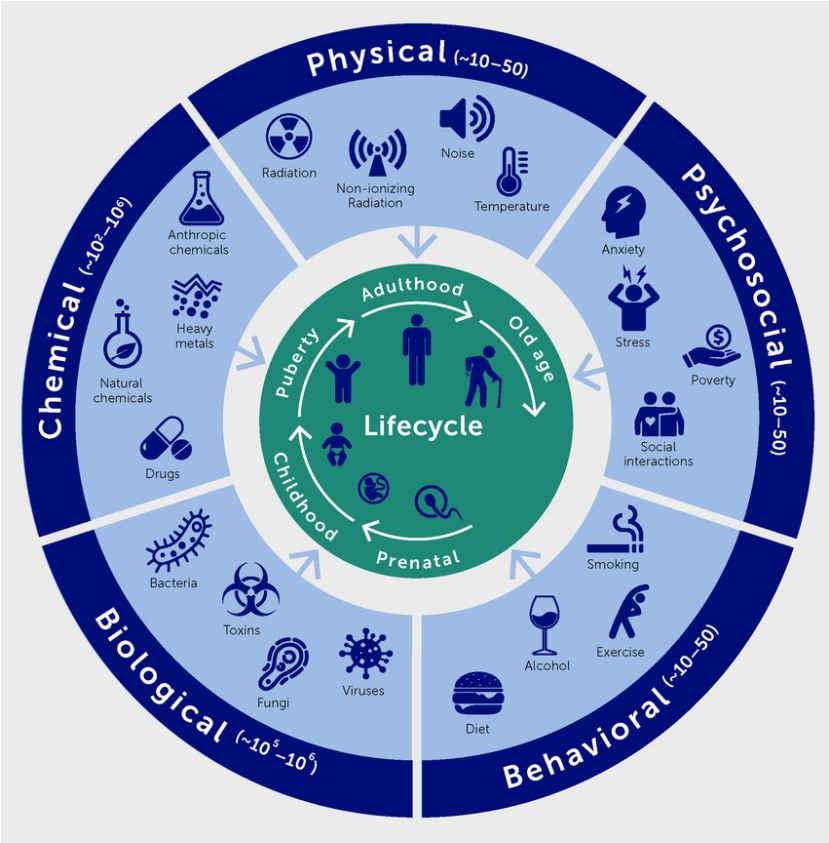


Figure 4 : Représentation graphique de l'exposome humain (Cauchemez et al. [116])

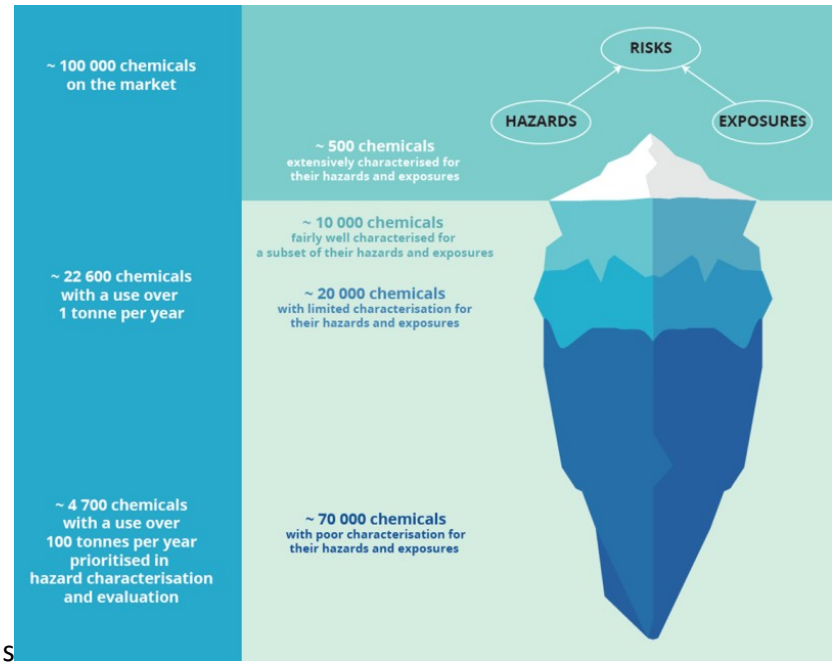


Figure 5 : « Le territoire inconnu des risques chimiques » [117]

A.2. Politiques publiques : suffisamment efficaces ?

D'une manière générale, les politiques publiques sont classiquement définies comme « *les interventions d'une autorité investie de puissance publique et de légitimité gouvernementale sur un domaine spécifique de la société ou du territoire* » [118]. Comme le précise le Haut-commissariat à la Stratégie et au Plan, ces interventions peuvent s'inscrire « *dans différentes temporalités, à différents échelons (européen, national, local) et dans différents registres de l'action publique : en amont d'une action (prévention), en accompagnement de celle-ci ou en aval (réparation)* » [119]. Dans ce contexte, les travaux que j'ai menés à l'Ineris se sont le plus souvent inscrits dans le cadre du Plan national santé environnement.

Plan national santé environnement

Depuis 2004, la France élabore un plan national santé environnement (PNSE) tous les cinq ans [2, 17, 53, 109]. Inscrit dans le code de la santé publique avec la « loi santé publique » de 2004 [120], le PNSE vise aujourd'hui à coordonner et à mettre en cohérence de nombreuses actions des pouvoirs publics en matière de santé environnementale. Certains auteurs parlent de plan « *chapeau* » [119]. À la date de rédaction du présent manuscrit, il s'agit des derniers mois couverts par le PNSE 4 (2021-2025).

L'objectif général du PNSE 4 est de réduire les expositions environnementales préoccupantes, c'est-à-dire celles pouvant mener à des effets sanitaires significatifs en lien avec une dégradation de la qualité de l'environnement. Pour atteindre cet objectif, le plan s'appuie notamment sur des actions incitatives de prévention, en particulier auprès de la population générale, et sur des actions visant la limitation de certaines sources d'émission de substances préoccupantes.

Le PNSE 4 s'articule autour de quatre axes [109] :

- « *s'informer, se former et informer sur l'état de notre environnement et les bons gestes à adopter pour notre santé et celle des écosystèmes ;*
- *réduire les expositions environnementales affectant la santé humaine et celle des écosystèmes sur l'ensemble du territoire ;*
- *démultiplier les actions concrètes menées par les collectivités dans les territoires ;*
- *mieux connaître les expositions et les effets de l'environnement sur la santé des populations et sur les écosystèmes* ».

Par ailleurs, le PNSE 4 considère également le volet « positif » de la santé environnementale, à savoir les environnements bénéficiant à la santé : « *protéger l'environnement naturel procure des bénéfices sur la santé physique et mentale des sociétés humaines, et permet de réduire les expositions aux pollutions* » [109]. En particulier, le PNSE 4 s'inscrit « *dans une approche « Une seule santé », intégrant également la santé des écosystèmes et […] promouvant des solutions fondées sur la nature* » [109].

Un comité de suivi national appelé Groupe santé environnement (GSE) assure le suivi et l'orientation de la mise en œuvre des actions des PNSE [121]. Le GSE est composé de différents collèges (État, collectivités territoriales, parlementaires, associations, entreprises, organisations syndicales) visant à représenter la société, auxquels s'ajoutent des personnalités qualifiées, des professionnels du système de santé et des représentants d'organismes d'assurance maladie.

Les PNSE ont fait l'objet de plusieurs évaluations :

- le PNSE 2 a été évalué par le HCSP en 2013 [9], en s'appuyant notamment sur une « *contribution* » de certaines inspections générales [122] ;
- le PNSE 3 a été évalué par les inspections générales de la Santé et de l'Environnement en 2018. Cette évaluation a fait l'objet de deux rapports distincts : un rapport de l'inspection générale des affaires sociales (IGAS) [73] et un rapport du Conseil général de l'environnement et du développement durable (CGEDD, aujourd'hui inspection générale de l'environnement et du développement durable (IGEDD)) [123] ;
- les PNSE 1, PNSE 2 et PNSE 3 ont été globalement évalués par le HCSP en 2022 [124].

Le PNSE 1 n'a pas fait l'objet d'une évaluation formalisée. Néanmoins, le Commissariat général au développement durable (CGDD) a produit un travail qui visait à contribuer à l'évaluation du PNSE 1 et à l'élaboration du PNSE 2 [125].

Mauvaises évaluations récurrentes

Si « *l'existence même des PNSE constitue un élément positif pour créer une dynamique nationale autour de la santé-environnement et donner de la visibilité à ces sujets* » [76], les évaluations des PNSE ont globalement conclu à de fortes insuffisances, notamment au regard des enjeux sanitaires associés. Notamment :

- selon le CGDD, pour le PNSE 1, « *le point essentiel [est] qu'il faut prévoir les modes et outils d'évaluation et de suivi au moment de la conception du plan* » [125] ;
- selon le HCSP [9], le PNSE 2 est « *un plan « panoramique » qui a tendance à tout aborder sans priorisation et structuration. En particulier, les actions et les priorités ne sont pas basées assez systématiquement sur des données probantes* ». De plus, « *les*

objectifs énoncés sont cohérents avec l'état des lieux présenté mais ils ne sont pas précis (en termes de temporalité, d'ampleur des résultats attendus) et ne sont presque jamais quantifiés ». En outre, « *il existe globalement un manque d'indicateurs* ».
Le « *constat d'un manque de priorités* » et de « *la nécessité de disposer de données et d'indicateurs sanitaires et environnementaux robustes* » est partagé par les inspections générales [122] ;

- selon l'IGAS [73], pour le PNSE 3, « *en termes d'objectifs, très peu d'actions visent à diminuer l'exposition aux facteurs nocifs. Les actions sont pour la plupart non quantifiées, que ce soit en termes d'enjeux ou en termes d'objectifs ; elles ne sont pas assorties d'objectifs de résultat ; les moyens d'agir ne sont pas définis ; […] aucun budget ne lui est associé. Le PNSE 3 ne répond pas aux critères de précision et de mesurabilité énoncés en 2009 par la direction générale de la santé (DGS), et qui sont nécessaires à l'opérationnalité. […] Les constats exposés soulignent un grand décalage entre le PNSE 3 et les enjeux auxquels il a vocation à répondre* » ;
- selon le CGEDD [123], pour le PNSE 3, « *la caractéristique principale consiste en une absence totale d'indicateurs sur les effets attendus en matière de niveau de santé, malgré la proposition par le Haut conseil de Santé publique (HCSP) en ce sens* ». Le PNSE 3 « *n'est pas conçu pour qu'on mesure son impact en termes d'amélioration de la santé des Français. Il n'est donc pas possible de dire avec précision ce qui a changé, du fait du 3e PNSE, dans l'état sanitaire de la population, ou a minima sur son exposition à différentes nuisances* » ;
- le HCSP « *regrette que les recommandations des rapports d'évaluation du PNSE 2 n'aient pas été prises en compte dans le PNSE 3, [notamment concernant la nécessité] d'avoir des indicateurs d'objectifs et de résultats* » [124]. De même, « *les évaluations a posteriori par le HCSP […] et par les inspections générales […] n'ont pas conduit à une amélioration […] de la nécessité de prioriser les actions* » [124].

D'autres types d'acteurs, dont la position me paraît permettre d'apporter un éclairage complémentaire intéressant sur l'efficacité du PNSE 3, ont publiquement exprimé un avis assez sévère, parfois avec des formulations moins policées que celles du HCSP et des inspections générales. Par exemple :

- selon la Commission d'enquête de l'Assemblée nationale de 2020 sur l'évaluation des politiques publiques de santé environnementale, ayant auditionné les principaux scientifiques et parties prenantes du domaine de la santé environnementale en France, « *le plan national santé-environnement est ineffectif, […] le plan national santé-environnement ne sert à rien [: il est un] exercice de pure communication, sans prise sur le réel* » [126] ;
- selon William Dab, Directeur général de la santé (DGS) entre 2003 et 2005, c'est-à-dire au moment où l'élaboration quinquennale des PNSE est entrée dans la loi et où le premier PNSE est entrée en vigueur, « *le constat tiré par les inspecteurs est particulièrement affligeant, […] Il est très rare que, sur un sujet aussi important que l'impact de l'environnement sur la santé, une politique publique se situe à un tel niveau de défaillance* » [127] ;
- si le PNSE 3 n'a pas suffisamment intégré les recommandations issues de l'évaluation du PNSE 2 [123], le PNSE 4 ne semble pas avoir complètement évité le même type d'écueil. Par exemple, plusieurs inspections générales ont souligné qu'« *aucun*

indicateur de résultat lié à la diminution effective de risques pour la santé-environnement n'a été retenu » [76] ; de même, une mission d'information du Sénat souligne qu'« *aucune de ses actions n'affiche d'objectif quantifié de réduction des risques ou des expositions* » et recommande « *des indicateurs de résultat plus exigeants* » [128]. Par conséquent, comme pour les PNSE précédents, l'impact du PNSE 4 sera probablement difficile à évaluer.

L'avis d'Élisabeth Gnansia, présidente de la Société francophone de santé et environnement (SFSE) lors de la fin du PNSE 3 et du début du PNSE 4, est aussi particulièrement sévère [129] : « *On a souvent l'impression qu'on repart à chaque fois de zéro. [Le PNSE 4] ne présente en effet pas d'objectif clair, et n'indique pas qui pilotera les actions. On a reproché au PNSE 3 d'être un catalogue d'actions, mais le PNSE 4 se rapproche plutôt d'une brochure publicitaire !* »

Au-delà des aspects techniques et scientifiques, les évaluations des PNSE ont également souligné le manque de moyens disponibles en appui à la mise en œuvre des actions prévues. En particulier, aucun PNSE ne précise le budget officiellement affecté à son contenu, ce qui ne conduit pas à un contexte favorable dans les situations d'arbitrages budgétaires. Comme le rappelle le HCSP, « *le fait qu'une action soit inscrite dans un plan n'est pas une garantie pour les opérateurs de ressources ou de budget qui sont négociés dans d'autres cadres* ». En ce sens, Sébastien Denys, directeur santé-environnement-travail de Santé publique France (SpF), souligne que « *l'obtention de financements (…) représente un combat quotidien [car] les budgets des études que nous souhaitons poursuivre et qui s'avèrent très coûteuses ne sont pas associés aux plans. Nous sommes contraints d'engager des négociations au cas par cas, pour chaque projet* » [126]. De manière plus anecdotique mais symbolique, les inspecteurs de l'IGEDD ont mis en avant leur surprise d'apprendre que « *la politique de santé-environnement, concernant plus de 60 000 décès par an, est pilotée par 0,4 ETP [équivalent temps plein]* » [126].

Plus généralement, ce manque d'explicitation des budgets prévus peut conduire à des difficultés autres que techniques : par exemple, selon le HCSP, « *le manque d'affichage des financements pour les PNSE 2 et 3 a laissé aux pouvoirs publics la capacité de prioriser les actions en fonction de considérations qui pouvaient être de nature variable, sans contrôle des parties prenantes d'où les controverses. Il faut souligner qu'en général les plans ont été construits avant de se préoccuper des moyens financiers et humains qui devaient permettre leur réalisation* » [124]. En ce sens, lors de leur audition par la Commission d'enquête parlementaire, les inspecteurs du CGEDD ont considéré que les actions du PNSE, « *sans aucun moyen financier associé, relèvent davantage de la communication que d'une réelle volonté d'agir* » [126] ; dans une logique similaire, le Haut-commissariat à la Stratégie et au Plan indique que les plans de santé environnementale « *sans moyens spécifiques […] s'apparentent à un exercice de communication politique* » [119].

Trop peu de résultats

Parmi les critiques formulées à l'encontre de l'action des pouvoirs publics, le manque de résultats en termes de réduction des risques mesurable est souvent souligné, notamment pour ce qui concerne les actions des PNSE. L'ampleur de l'impact sanitaire rappelée plus haut me

semble être un indicateur illustrant bien les limites des politiques publiques actuelles en santé environnementale. En complément, deux exemples me paraissent également symboliques de ce manque d'efficacité.

Biosurveillance

En matière d'expositions de la population générale aux polluants environnementaux, une surveillance peut être réalisée en mesurant ces polluants et leurs produits de dégradation (« métabolites ») dans divers éléments corporels (« matrices biologiques ») ; on parle de « biosurveillance ». Les éléments du corps peuvent concerner, entre autres, le sang, les urines, les cheveux, le lait maternel ou le cordon ombilical. Les concentrations obtenues sont, en quelque sorte, la marque de ces expositions dans l'organisme : on parle de « biomarqueurs ».

Dans le cadre du programme national de biosurveillance [130], plusieurs études d'imprégnation [131-138] ont globalement conclu à la présence de nombreuses substances préoccupantes dans les organismes des Français comme, par exemple, les pesticides organochlorés et pyréthrinoïdes, les PCB, les dioxines et furanes, les métaux et métalloïdes, les phtalates, les retardateurs de flammes, les parabènes ou les éthers de glycol. Au global, plusieurs centaines de substances ont pu être trouvées dans nos corps avec des mesures spécifiques et, si des budgets appropriés étaient disponibles, plusieurs milliers seraient probablement mesurées [65], ce qui n'est pas surprenant puisque la population générale est quotidiennement exposée à des milliers de substances [139].

Les effets d'une telle imprégnation sont peu connus. À quelques exceptions près, comme les dioxines, le plomb ou le chlordécone, les niveaux mesurés ne peuvent pas donner lieu à une interprétation en termes de risques sanitaires : des seuils d'innocuité n'ont pas été élaborés [65, 126], notamment par manque de connaissances [140], et les effets des mélanges de substances sont souvent difficiles à caractériser [141-143].

Étiquetage des meubles

L'action H du PQAI, intégré au PNSE 3, consistait à « *rechercher un accord volontaire avec les professionnels du meuble pour aller vers une meilleure information des émissions de polluants volatils du mobilier, avec une priorité sur les meubles pour enfants* ». Cette action s'inscrivait dans un contexte assez favorable à la mise en place d'un étiquetage sur les émissions issues du mobilier :

- les enjeux liés aux émissions de polluants volatils issues des meubles ont été identifiés par les pouvoirs publics depuis de nombreuses années [144].
- La mise en place d'un étiquetage portant sur ces émissions est prévue dans une loi datée de 2010 et issue du Grenelle de l'environnement [30].
  Cette même loi a conduit à un étiquetage similaire portant sur les produits de construction et les revêtements [145, 146], mis en œuvre depuis 2011.
- Une étude de l'Anses, datée de 2015, a identifié les substances sur lesquelles fonder cet étiquetage [147].

Néanmoins, malgré ce contexte favorable, il n'y a toujours pas d'étiquetage sur les émissions des meubles en polluants volatils. Un peu plus d'informations pour éclairer le choix des consommateurs aurait pourtant été bienvenu, surtout quand les nouvelles connaissances

scientifiques mettent typiquement 7 à 20 ans pour intégrer les tests de toxicité réglementaires [148].

Avancées trop lentes

Si, comme le souligne en 2025 le Haut-commissariat à la Stratégie et au Plan, les politiques publiques de santé environnementale peuvent être jugées « *insuffisantes face aux enjeux* », pas « *à la hauteur de la montée en charge des enjeux de santé environnementale* » [119], ce constat peut aussi être partagé à l'échelle internationale. Par exemple, dans sa « *Stratégie pour la durabilité dans le domaine des produits chimiques : vers un environnement exempt de substances toxiques* », datée de 2020, la Commission européenne acte le manque de résultats obtenus, au niveau mondial, avec des formulations que je trouve assez parlantes : « *En 2015, la communauté internationale a réaffirmé sa détermination à atteindre l'objectif consistant à parvenir à une bonne gestion des produits chimiques au niveau mondial d'ici à 2020, ce qui constitue également un élément transversal essentiel pour atteindre la plupart des autres objectifs de développement durable. Même si d'importants efforts ont été déployés à tous les niveaux, les avancées restent lentes et insuffisantes et cet engagement mondial n'a pas été respecté. Un véritable sentiment d'urgence doit s'imposer* » [108]. Un même constat d'avancées trop lentes avait été mis en avant en 2019 par le Programme des Nations unies pour l'environnement (PNUE) [149], faisant déjà suite à un constat similaire dans son rapport *Global Chemicals Outlook* de 2013 : « *Les gouvernements nationaux, les organisations internationales et intergouvernementales ainsi que les grandes entreprises ont accompli des progrès importants dans la gestion des risques liés aux produits chimiques dangereux. Cependant, ces progrès ont été lents et les résultats sont trop souvent insuffisants* » [150].

Comme le souligne le CGEDD, viser une meilleure efficacité dans les politiques publiques en matière de santé environnementale, c'est viser « *au premier chef à épargner un nombre considérable de décès prématurés et à limiter des atteintes graves et non inéluctables à la santé* » [123]. Dans cet objectif, les décideurs chargés de l'élaboration de ces politiques publiques ont besoin d'éléments d'aide à la décision adaptés, apportant des éclairages utiles sur les transferts des substances préoccupantes dans les milieux environnementaux et sur les potentiels effets sanitaires associés. Dans ce contexte, la démarche d'évaluation des risques sanitaires peut être utile pour répondre aux manques identifiés, tels que l'élaboration indicateurs liés à la diminution effective de risques, la gestion proactive, ou encore l'identification de priorités dans un contexte de budgets restreints.

A.3. Démarche ERS : un outil utile aux décideurs

Présentation

Contenu

Dans le cadre de cette thèse, la définition retenue pour l'évaluation des risques sanitaires (ERS) est une démarche qui vise à « *décrire et quantifier les risques sanitaires consécutifs à l'exposition de personnes à des substances toxiques* » [151]. Dans d'autres contextes, cette définition peut être élargie aux agents dangereux d'autre nature comme, par exemple, le risque physique (ondes, fibres, bruit, etc.) ou le risque biologique (bactéries, virus, moisissures, etc.) [152].

Cette démarche a été initialement développée par l'Académie des sciences des États-Unis d'Amérique (National Research Council (NRC)). Elle s'appuie notamment sur deux documents de référence : le « *Red Book* » [153], publié en 1983, et le « *Silver Book* » [154], publié en 2009. Cette démarche est aujourd'hui utilisée dans de nombreux contextes, en France et à l'international. En particulier, elle constitue une méthode couramment utilisée en santé environnementale [55, 75, 151, 155-161].

La démarche ERS comprend quatre étapes [153] :

1. Identification des dangers

Il s'agit d'identifier et de décrire les substances dangereuses (ou « substances toxiques »[2]) en présence, c'est-à-dire celles pouvant avoir des effets nocifs sur la santé humaine.

2. Évaluation des relations dose-réponse

Pour les substances dangereuses identifiées, cette étape vise à établir des relations entre, d'un côté, la dose d'exposition à laquelle est soumis un individu, et de l'autre côté, l'apparition d'effets sanitaires chez cet individu.

Deux types d'effets sont distingués : les effets à seuil - un effet peut apparaître lorsque la dose d'exposition dépasse un certain seuil - et les effets sans seuil - quelle que soit la dose d'exposition, il y a toujours un excès de risque par rapport à un individu non exposé. Et ainsi, la relation dose-réponse porte soit sur la possibilité d'apparition - effets à seuil - soit sur la probabilité d'apparition - effets sans seuil.

En pratique, ces relations dose-réponse sont caractérisées par des valeurs toxicologiques de référence (VTR), à seuil ou sans seuil. Ces VTR portent sur un « effet critique », soit le premier effet délétère qui apparaît avec l'augmentation de l'exposition, dans une logique protectrice de la santé. Une VTR à seuil correspond à un niveau d'exposition en-dessous duquel aucun effet n'est attendu. Une VTR sans seuil correspond à l'excès de risque associé à une unité de dose d'exposition pendant la vie entière.

3. Évaluation des expositions

Pour l'individu considéré, il s'agit d'évaluer les quantités de substances dangereuses reçues par inhalation, par ingestion et par contact cutané. Classiquement, ces quantités reçues correspondent à une période pouvant durer plusieurs dizaines d'années à partir de la date de l'évaluation : les ERS sont donc généralement des exercices prospectifs.

Différents types d'expositions sont distingués en fonction de leur durée : aiguës ou « de court terme » (de quelques heures à quelques jours), subchroniques (de quelques semaines à quelques mois) et chroniques (à partir d'un an).

[2] Les termes « Substances dangereuses » et « substances toxiques » sont ici considérés comme synonymes.

4. Caractérisation des risques

Cette caractérisation consiste à synthétiser les informations collectées aux étapes précédentes, en mettant en regard les expositions évaluées et la toxicité des substances étudiées. Cette synthèse est généralement quantitative, avec le calcul de deux indicateurs de risque appelés Quotient de danger (QD), pour les effets à seuil, et Excès de risque individuel (ERI) pour les effets sans seuil (Figure 6). Ces quantifications sont souvent interprétées au regard de critères d'acceptabilité [162] ; dans tous les cas, elles s'accompagnent d'une identification, d'une évaluation et d'une discussion des incertitudes associées.

Parfois, les données disponibles sur une substance ne permettent pas de quantifier une relation dose-réponse - et donc un risque sanitaire *in fine* - mais elles peuvent présenter d'autres propriétés qui soulèvent des préoccupations chez les acteurs concernés. Par exemple : premiers éléments de preuve pour un type de toxicité jugé grave (cancérogène, reprotoxique, perturbateur endocrinien, etc.), persistance dans l'environnement, capacité de bioaccumulation. On peut alors parler de « substances préoccupantes ».

	Effets à seuil	Effets sans seuil
Inhalation	$QD = \frac{CI}{VTR_{AS,inh}}$	$ERI = \sum CI_i \times \frac{T_i}{T_m} \times VTR_{SS,inh}$
Ingestion	$QD = \frac{DJE}{VTR_{AS,ing}}$	$ERI = \sum DJE_i \times \frac{T_i}{T_m} \times VTR_{SS,ing}$

Figure 6 : Quotient de danger (QD) et Excès de risque individuel (ERI), pour les voies inhalation et ingestion [52]

- *CI : concentration moyenne inhalée (exposition par inhalation), en µg/m³*
- *DJE : dose journalière d'exposition (exposition par ingestion), en mg/kg/j*
- *$VTR_{AS,\ inh}$: valeur toxicologique de référence, à seuil, pour la voie inhalation, en µg/m³*
- *$VTR_{AS,\ ing}$: valeur toxicologique de référence, à seuil, pour la voie ingestion, en $mg/kg_{PC}/j$*
- *$VTR_{SS,\ inh}$: valeur toxicologique de référence, sans seuil, pour la voie inhalation, en $(\mu g/m^3)^{-1}$*
- *$VTR_{SS,\ ing}$: valeur toxicologique de référence, sans seuil, pour la voie ingestion, en $(mg/kg_{PC}/j)^{-1}$*
- *T_i : durée de la période d'exposition i (en années) sur laquelle l'exposition (CI_i et DJE_i) est calculée*
- *T_m : durée de la vie (en années)*

Schéma conceptuel

En santé environnementale, une ERS se base très souvent sur un schéma conceptuel d'exposition (couramment appelé « schéma conceptuel ») [52, 154, 163] ; il s'agit d'une représentation graphique simple (Figure 7) des relations entre :

- les sources d'émission en présence ;
- les milieux environnementaux de transfert et les milieux d'exposition (par exemple : eau, air, sol) liés aux usages des populations considérées ;

- les populations et les voies d'exposition associées (inhalation, ingestion, contact cutané).

En particulier, l'élaboration du schéma conceptuel permet d'adapter l'ERS aux spécificités de la situation étudiée.

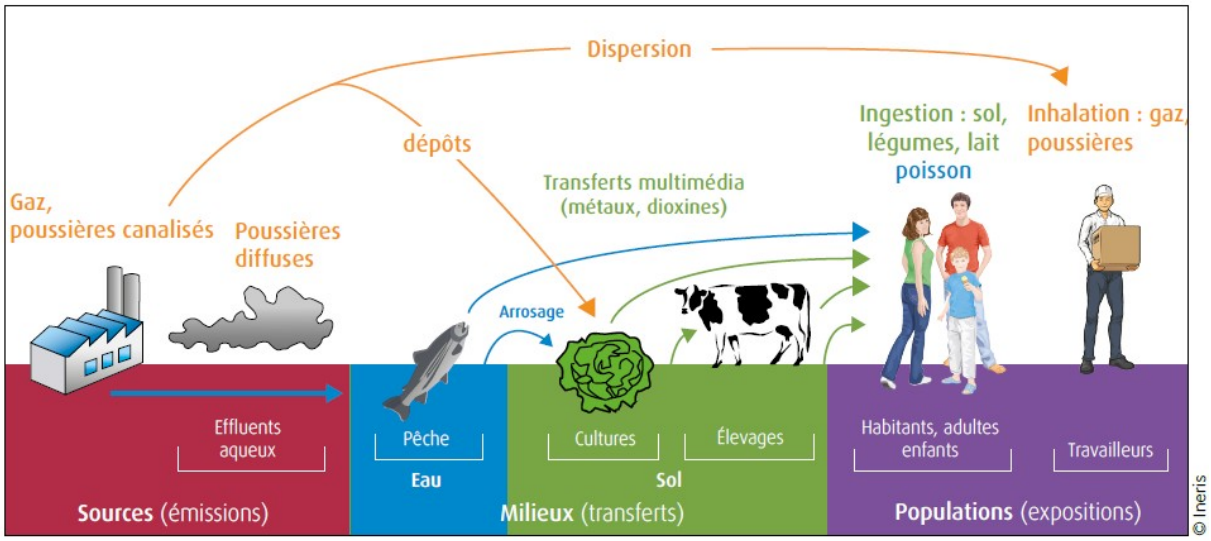


Figure 7 : Schéma conceptuel générique pour le cas des ICPE, indiqué à titre d'illustration dans le guide Évaluation de l'état des milieux et des risques sanitaires (« guide ICPE ») [52]

Le schéma conceptuel d'exposition est également connu sous le nom de « schéma sources-vecteurs-cibles » (SVC) ou « continuum sources-vecteurs-cibles », pouvant intégrer la notion de risque en complément de l'exposition (Figure 8).

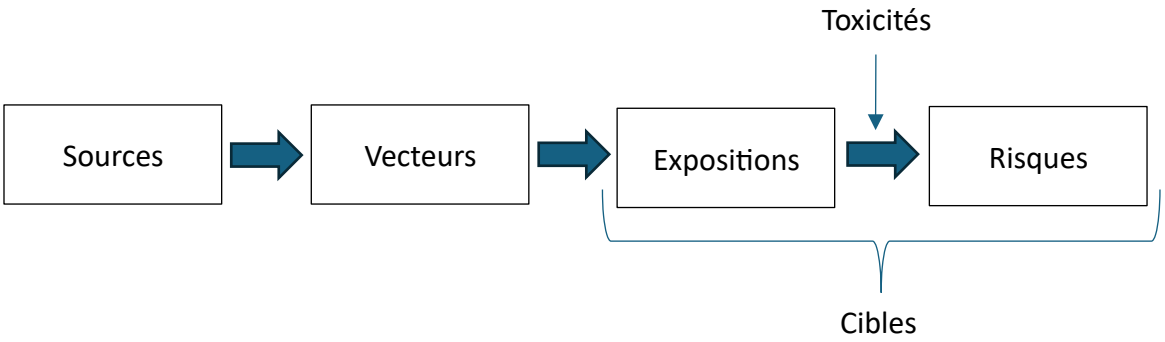


Figure 8 : Continuum « sources - vecteurs – cibles » (SVC)

Note : l'évaluation de la toxicité des substances est l'objet d'une discipline spécifique : la toxicologie. Le plus souvent, en santé environnementale, l'évaluateur de risques sanitaires s'appuie donc sur des bases de données produites par des comités d'experts toxicologues [164] : en pratique, ces données de toxicité sont souvent considérées comme des données d'entrée des ERS.

D'une manière générale, dans les travaux que j'ai pu mener :

- les vecteurs considérés sont des milieux environnementaux. Par exemple : eau, air, sol. Dans le domaine des risques sanitaires, ces milieux sont considérés comme des moyens par lesquels des polluants peuvent rentrer en contact avec des cibles humaines (exposition) ; en particulier, les habitats écologiques associés ne font pas partie des cibles retenues.
- les cibles considérées correspondent aux individus de la population (humaine) générale.
  À ce niveau, l'évaluation des risques s'appuie sur une évaluation des expositions, couplée aux données caractérisant la toxicité des substances étudiées.

Traitement des incertitudes

Dans un domaine où les connaissances scientifiques sont incomplètes et où les sources d'incertitudes sont nombreuses, l'ERS est une méthode d'analyse structurée, où les éléments d'information sont collectés, ordonnés et évalués [156]. Sur cette base, l'ERS vise à quantifier le risque d'une manière transparente et à permettre au gestionnaire du risque d'agir avec la meilleure visibilité possible sur les situations de pollution qu'il considère. Ces situations sont souvent associées à des incertitudes significatives. Les quantifications fournies par l'ERS visent notamment à lui fournir une connaissance de l'influence possible de chaque décision potentielle sur la santé des populations exposées. En ce sens, le guide ICPE indique : « *l'évaluation doit s'appuyer sur les connaissances scientifiques et les données disponibles propres au [cas d'étude]. À chaque étape, l'évaluation doit être comprise comme un cheminement visant à structurer ces éléments de connaissance dans l'objectif d'aider à la prise de décision en situation d'incertitude. La démarche s'accommode du déficit de connaissance et de l'existence d'inévitables incertitudes scientifiques. Ainsi, dans cette démarche, l'évaluateur est amené à faire des hypothèses et à prendre des options pour mener à bien son analyse* » [52].

Dans ce contexte l'évaluateur s'appuie sur quatre principes généraux [151] :

1) Principe de spécificité

Ce principe demande que les choix de l'évaluateur correspondent aux caractéristiques particulières de la situation étudiée (sources, vecteurs, cibles).

2) Principe de prudence scientifique

Ce principe consiste à adopter, en cas d'absence de données reconnues, des hypothèses majorant raisonnablement les risques, c'est-à-dire des hypothèses raisonnablement protectrices pour la santé des populations exposées.

3) Principe de proportionnalité

Inscrit à l'article R122-5 du code de l'environnement, ce principe veille à ce qu'il y ait cohérence entre le degré d'approfondissement de l'évaluation et les risques attendus. En pratique, ce principe conduit souvent à une démarche par itération, chaque étape successive correspondant à un niveau d'approfondissement plus élevé.

Suivant ce principe, dans l'objectif de démontrer l'absence de situation préoccupante pour les personnes considérées, un évaluateur de risque peut commencer par prendre en compte des

hypothèses d'exposition simples et majorantes. Par exemple, pour un polluant très volatile et peu bioaccumulable émis par une ICPE, l'évaluateur peut considérer un individu fictif vivant constamment au niveau des concentrations dans l'air maximales trouvées autour du site. Si les risques calculés sont non préoccupants, alors cette conclusion peut être généralisée à l'ensemble des riverains de l'ICPE, puisqu'ils sont moins exposés que cet individu fictif ; ce cas de figure est fréquent pour les risques attendus comme faibles. Dans le cas contraire, l'évaluateur doit affiner les hypothèses retenues. Par exemple, si le lieu associé aux concentrations maximales est une entreprise, l'évaluateur peut considérer un individu fictif travaillant dans cette entreprise (environ 20 % du temps (8 h/j, 218 j/an) [52]) et habitant au sein de la maison la plus exposée dans l'environnement du site. Et ainsi de suite, si besoin, par affinements successifs. Et s'il n'est pas possible de montrer l'absence de situation préoccupante malgré des hypothèses d'exposition affinées au maximum, alors il faudra envisager l'étude d'émissions plus faibles pour l'ICPE considérée.

4) Principe de transparence

« *Étant donné qu'il n'existe pas une connaissance absolue, le choix des hypothèses, des outils à utiliser, du degré d'approfondissement nécessaire relève du jugement et du savoir-faire de l'évaluateur face à chaque cas d'étude particulier. Ces choix doivent être cohérents et expliqués par l'évaluateur, afin que la logique du raisonnement puisse être suivie et discutée par les différentes parties intéressées. L'objectif de transparence des termes de la conclusion de l'étude sera ainsi respecté* » [52] : dans une ERS, la transparence est à la fois un moyen et un résultat visé. En d'autres termes, le principe de transparence porte à la fois sur le processus de l'évaluation - les hypothèses et les choix de l'évaluateur sont explicités - et sur le produit de l'évaluation – l'ERS explicite et évalue ce qui est connu, ce qui ne l'est pas et les incertitudes en présence.

Cette explicitation et cette évaluation des incertitudes rend plus signifiants les résultats numériques issus des indicateurs de risques usuels (QD, ERI). En effet, pour pouvoir interpréter et utiliser adéquatement les résultats de l'ERS, le gestionnaire du risque a besoin de comprendre comment ces résultats ont été obtenus, sur quels choix et quelles hypothèses ils se fondent, quelles incertitudes y sont associées. En particulier, des compléments d'études peuvent parfois réduire ces incertitudes, mais rarement les supprimer.

Au final, comme le résume William Dab, la démarche ERS peut être considérée comme un moyen de gérer les incertitudes : « *l'évaluation des risques consiste donc en un traitement de l'information scientifique permettant de mettre à la disposition des décideurs, l'ensemble des données disponibles sur une substance, un agent, une situation ou un produit sur lequel des interrogations sont portées concernant l'impact sur la santé humaine. À chacune des étapes, il s'agit de passer en revue de façon critique les connaissances disponibles et d'apprécier leur qualité. Le fait qu'il persiste de nombreuses incertitudes ne doit pas conduire à refuser l'utilisation d'informations scientifiques pour la prise de décisions en santé publique. Au contraire, c'est parce que ces incertitudes existent qu'une démarche rationnelle est nécessaire pour éviter que les conflits d'intérêts ou que les arguments passionnels soient les seuls éléments à être pris en considération dans une démarche décisionnelle. Les décideurs ont besoin d'avoir à leur disposition des synthèses argumentées sur les dangers et les risques* » [75]. Autrement dit, les incertitudes résiduelles ne sont pas une faiblesse intrinsèque à la démarche ERS : c'est précisément parce qu'une situation présente des incertitudes non résolubles qu'il est utile au décideur de mettre en œuvre une démarche ERS, dans l'objectif de mieux clarifier les différentes caractéristiques de la situation qu'il considère.

Apports attendus

En mettant en regard, d'une part, les critiques formulées à l'encontre de l'action publique en santé environnementale (section A.2) et, d'autre part, les caractéristiques de la démarche ERS présentées à la sous-section précédente, il est attendu que cette démarche puisse apporter des éléments d'aide à la décision utiles pour contribuer à lever certaines difficultés actuellement rencontrées par les pouvoirs publics.

Voici quelques exemples permettant de viser un gain d'efficacité dans les politiques publiques en matière de santé environnementale :

- Les indicateurs de risques usuellement utilisés dans les ERS (QD et ERI) correspondent à une caractérisation quantifiée des risques liés aux substances et aux individus considérés ; ils peuvent donc servir ou être utilisés pour construire des « *indicateur[s] de résultat lié à la diminution effective de risques pour la santé-environnement* » [76].
- des QD et des ERI peuvent être calculés pour chaque composante des situations étudiées. Par exemple : pour chaque substance, pour chaque source d'émission, pour chaque milieu de transfert, pour chaque voie d'exposition, pour chaque type de population exposée, etc. Des QD et des ERI peuvent aussi être calculés pour caractériser globalement chaque situation étudiée.
  Les valeurs de QD et d'ERI obtenues permettent alors de hiérarchiser en fonction des risques attendus :
  - les différentes composantes d'une situation étudiée. Par exemple, dans le cas des ICPE : les sources d'émission, les voies d'exposition (inhalation, ingestion, contact cutané), les vecteurs d'exposition (air, eau, produits végétaux, sol, produits animaux, etc.), les lieux où des personnes sont exposées, les classes d'âge des personnes exposées, etc.
  - les différentes situations étudiées entre elles.

  Ceci peut être utilisé pour contribuer à établir une « *priorisation des actions* » [124] considérées pour les politiques publiques de santé environnementale, sur la base de « *données probantes* » [9].
- En contexte de ressources budgétaires restreintes, cette priorisation peut être utilisée pour contribuer à une répartition optimisée des budgets disponibles [73], ce qui faciliterait probablement leur affectation et leur affichage par les pouvoirs publics : ceci devrait contribuer à ce que « *l'obtention de financements [ne] représente [plus] un combat quotidien* » [126].
- Différents scénarios ou différentes mesures de gestion des risques peuvent être traités avec la démarche ERS [154], ce qui peut contribuer à caractériser la « *temporalité [et l']ampleur des résultats attendus* » [9].
- L'étape d'évaluation des expositions de la démarche ERS peut directement servir à fixer des objectifs à des « *actions [qui] visent à diminuer l'exposition aux facteurs nocifs* » [73] et l'« *exposition à différentes nuisances* » [123].

Ces premiers exemples découlent directement de la mise en regard des principales critiques identifiées et du contenu de la démarche ERS. D'autres résultats issus de cette démarche, adaptable selon les contextes d'études, peuvent appuyer utilement l'amélioration de

l'efficacité des politiques publiques en matière de santé environnementale, et mériteraient donc d'être développés et approfondis. Cette thèse se propose de contribuer à cet objectif.

Problématique générale de la thèse

Problématique

Au regard des éléments présentés ci-dessus, cette thèse propose donc une réflexion autour de la problématique suivante : « *Comment la démarche ERS peut-elle contribuer à l'élaboration de politiques publiques visant des environnements favorables à la santé ?* ». En effet, comme le souligne la Commission d'enquête parlementaire de 2020, « *la santé environnementale constitue d'ores et déjà, et ne peut manquer de devenir encore davantage dans les décennies à venir, une préoccupation fondamentale pour notre siècle* » [126]. De plus, l'efficacité des politiques publiques actuelles a besoin d'être améliorée et, pour ce faire, les décideurs publics ont besoin d'éléments d'aide à la décision apportant des éclairages adaptés, visant notamment à aider à lever les verrous techniques et méthodologiques identifiés par les évaluateurs des PNSE.

Plutôt que le terme « santé environnementale », l'énoncé de cette problématique retient le terme « environnements favorisant la santé » [165], afin de souligner l'importance de ne pas considérer l'environnement uniquement comme une source de dangers : un environnement favorisant la santé est un environnement non (ou peu) dégradé par des pollutions et un environnement de qualité apportant des bénéfices pour la santé, tels que des « *environnements naturels* » [68]. En d'autres termes, un environnement favorisant la santé est un environnement présentant un minimum de facteurs de risques, afin de « *prévenir les maladies* » [166], et un maximum de facteurs protecteurs ou promoteurs de santé.

Cette logique s'est progressivement inscrite dans les PNSE [124] : si les PNSE 1 et 2 n'en font pas la mention explicite [17, 53], le PNSE3 a inclus une action consistant à « *réaliser une expertise collective sur les effets positifs des espaces verts et des espaces de nature* » [2] ; puis, le PNSE 4 a souligné que « *protéger l'environnement naturel procure des bénéfices sur la santé physique et mentale des sociétés humaines, et permet de réduire les expositions aux pollutions. À titre d'exemples : […] les espaces verts et les masses d'eau réduisent le stress et promeuvent l'activité physique* » [109]. Dans cette logique, le PNSE 4 introduit l'« *approche « Une seule santé », intégrant également la santé des écosystèmes et en promouvant des solutions fondées sur la nature* » [109], et met en avant des liens avec d'autres thématiques comme le bruit : « *les premiers « espaces calmes » labellisés seront créés [et] pourront être des lieux favorables à la nature* » [109].

La démarche ERS est adaptable au contexte et à l'objectif de l'étude, et je soutiendrai ici que sa logique sous-jacente peut également s'appliquer à ces « *effets positifs* » pour la santé des individus exposés. Cet élargissement est cohérent avec les périmètres assez larges de la définition de l'exposome - qui inclut les expositions favorables à la santé [167] - et de la définition de la santé environnementale par l'OMS [2-4], rappelée en introduction.

Au fil de mon parcours professionnel, la question de la problématique de cette thèse s'est posée à moi de manière récurrente ; les sections suivantes vont développer les éléments de réponse que j'ai pu identifier avec mes travaux, ainsi que les réflexions associées ; des pistes seront également proposées pour de futurs travaux, visant à approfondir et à tester d'autres éléments de réponse qui pourraient s'avérer utiles aux décideurs publics dans l'élaboration de

politiques publiques, et potentiellement aussi aux autres parties prenantes du domaine de la santé environnementale.

Collecte d'éléments de réponses sur la base d'études de cas

Les différents travaux d'expertise et de recherche que j'ai pu effectuer jusqu'ici (Partie 1) et qui vont être présentés plus en détail dans les sections suivantes, s'appuient notamment sur la démarche ERS ; ils peuvent être considérés comme autant d'études de cas ayant permis de réfléchir à cette problématique générale, ayant produit des éléments de réponse à la question posée et ayant permis d'identifier des pistes d'amélioration, en matière d'appui pour l'élaboration de politiques publiques.

Ces travaux ont été menés dans le cadre d'un appui direct ou indirect aux pouvoirs publics. En d'autres termes, certains travaux ont fait l'objet de saisines de la part du ministère chargé de l'Écologie, au travers de programmes d'appui de l'Ineris ; d'autres travaux ont été menés dans le cadre d'une auto-saisine d'un organisme public de référence, tel que la CnDAspe. D'autres travaux ont été menés de manière proactive au sein de l'Ineris, sur la base d'un retour d'expérience issus de prestations auprès de clients privés, avec pour objectif de proposer des améliorations de méthodes de référence dans le domaine de la santé environnementale.

Ces différentes études de cas correspondent à autant de déclinaisons et d'adaptation de la démarche ERS, visant à répondre à différents types de questions, dans des contextes variés. Par exemple : élaboration d'une liste de substances dont les expositions doivent être réduites prioritairement (section B) ; amélioration de la qualité de l'air intérieur (section C) ; projet d'étiquetage de produits de consommation courante portant sur leurs émissions en polluants volatils (section C) ; maîtrise des émissions de sites industriels dans les milieux environnementaux (section D) ; usage de renaturation dans la gestion des sols pollués (section E). J'ai également eu l'occasion de prendre du recul sur les conditions dans lesquelles sont réalisées des ERS, en travaillant sur l'indépendance des processus d'évaluation au sein d'organismes publics en Europe (section F).

Présentation des résultats obtenus sous l'angle du schéma conceptuel

La problématique générale de la thèse jouera donc le rôle de fil conducteur reliant les différentes études présentées : chacun de ces travaux d'expertise et de recherche constitue une proposition de réponse à la question posée, cette réponse ayant été construite dans le contexte général des PNSE.

S'ils se situent dans différents sous-domaines de la santé environnementale, chacun des travaux réalisés se focalise plus particulièrement sur une ou deux étapes du continuum SVC qui encadre globalement les actions des pouvoirs publics. En d'autres termes, les travaux présentés vont montrer que la démarche ERS peut produire des éléments d'aide à la décision portant sur chaque niveau de ce continuum SVC, permettant *in fine* une meilleure gestion des risques. Ceci permet, en quelque sorte, de proposer une cartographie des travaux effectués : dans les sections suivantes de ce manuscrit, les travaux présentés vont donc être introduits en situant leur apport principal sur ce continuum SVC global, de manière graphique : les cases correspondantes seront colorées en vert sur un schéma spécifique, placé au début de chaque session présentant des travaux (par exemple, le schéma introductif de la section B se trouve à la page 49).

Puisque la problématique générale de la thèse et les travaux effectués s'inscrivent dans la logique des environnements favorisant la santé, il est également proposé de compléter le schéma classique du continuum SVC par les bénéfices pouvant être apportés par des expositions à des environnements de qualité. Ce « continuum sources-vecteurs-cibles augmenté » (« continuum SVCa ») est représenté à la Figure 9.

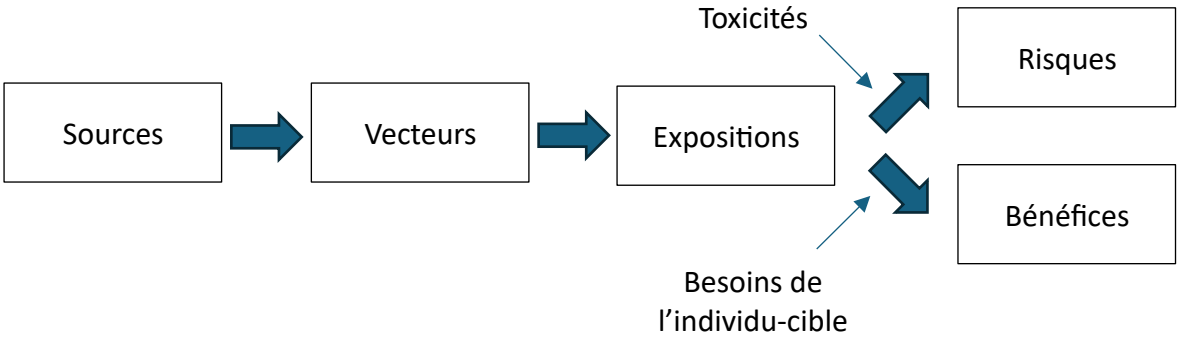


Figure 9 : Continuum SVC augmenté

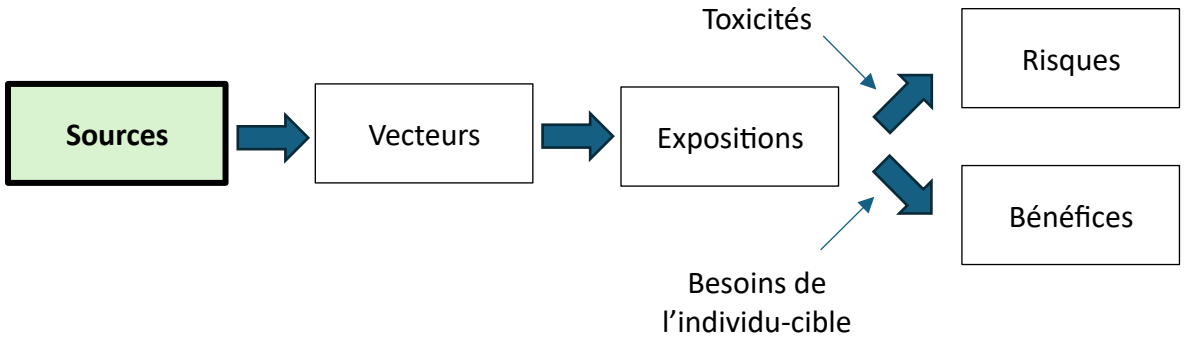
Dans les sections ci-dessous, les travaux seront présentés avec une synthèse reprenant les étapes de la structure *Introduction, Methods, Results, and Discussion* (IMRaD), suivie d'une analyse réflexive : points forts, limites et perspectives. Les textes complets des articles associés sont disponibles en fin de manuscrit, dans la section intitulée Copies des travaux les plus importants, qui débute à la page 156.

Concernant la problématique générale de la thèse, les éléments de réponse collectés seront discutés dans la partie 3.

B. Hiérarchisation de substances préoccupantes : appui méthodologique à la priorisation de l'action publique

« L'idée qu'il puisse exister un seuil universel de risque accepté socialement est vouée à l'échec. Car, en réalité, ce qui est acceptable ou non n'est pas tant le niveau de risque que le processus décisionnel aboutissant au choix d'une option de gestion du risque. »

William Dab [75]



Article original

Aide au choix de substances prioritaires en santé environnementale : un processus associant un avis d'expert et une analyse multicritère participative

Pour citer cet article : Karr G, Boudet C, Le-Gall AC, Brignon JM, Rouil L, Ramel M. Aide au choix de substances prioritaires en Santé environnementale : un processus associant un avis d'expert et une analyse multicritère participative. *Environ Risque Sante* 2014 ; 13 : 135-43. doi : 10.1684/ers.2014.0686

Article original

Aide au choix des substances prioritaires du futur Plan national santé environnement (PNSE3) : élaboration et mise en œuvre d'un indicateur de risque collectif

Pour citer cet article : Karr G, Pecassou B, Boudet C, Ramel M. Aide au choix des substances prioritaires du futur Plan national santé environnement (PNSE3) : élaboration et mise en œuvre d'un indicateur de risque collectif. *Environ Risque Sante* 2014 ; 13 : 232-43. doi : 10.1684/ers.2014.0705

Environ Risque Sante – Vol. 13, n° 3, mai-juin 2014

Un résumé de ces travaux est proposé ci-après, suivi d'une analyse réflexive. Les textes complets des articles associés sont disponibles en fin de manuscrit, dans la section intitulée Copies des travaux les plus importants, qui débute à la page 156.

B.1. Résumé des travaux

Introduction

Identifier et hiérarchiser des substances préoccupantes est une tâche complexe, car la notion même de substance préoccupante revêt un sens différent selon les réglementations, les politiques publiques, les exercices de hiérarchisation existants ou les opinions individuelles. En termes d'actions publiques, le choix de substances prioritaires s'appuie souvent sur des listes de substances construites sur la base d'avis d'experts, dont les logiques sous-jacentes ne sont pas explicitées. Comment apporter des aides à la décision plus transparentes et caractérisant mieux la diversité d'opinions en présence ?

Pour répondre à cette problématique, les travaux réalisés ont eu un double objectif :

- Dans un premier temps, il s'agissait d'élaborer une méthode générale (d'identification et) de hiérarchisation de substances préoccupantes devant prioritairement faire l'objet d'actions publiques. Par exemple : réduire leurs émissions dans l'environnement, mieux connaître leur présence dans les milieux environnementaux, interdire leur utilisation, etc.
- Dans un deuxième temps, il s'agissait de réaliser une application de la méthode élaborée, et ainsi de fournir des éléments d'aide à la décision pour établir la liste de substances du PNSE 3 (troisième plan d'actions national santé-environnement) dont les expositions pour la population générale devaient être réduites en priorité.

Concernant les modalités pratiques, les travaux se sont déroulés entre 2010 et 2013 et ont été réalisés à l'Ineris en collaboration avec Philippe Hubert, Anne-Christine Le Gall, Jean-Marc Brignon et Céline Boudet. Ces travaux se sont appuyés sur un conseil scientifique incluant des représentants d'organismes publics de référence, tels que Jean-Luc Volatier (Anses), Denis Zmirou-Navier (HCSP-CSRE), Corinne Mandin (Observatoire de la qualité de l'air intérieur - OQAI), Georges Salines (Institut de veille sanitaire (InVS), aujourd'hui Santé publique France (SpF)), Denis Belleville (Institut national de santé publique du Québec - INSPQ).

Méthode

La procédure d'élaboration de la méthode de hiérarchisation a inclus trois étapes : (i) recensement des principales listes de substances prioritaires existantes et analyse de leur méthode d'élaboration ; (ii) recensement et comparaison des méthodes d'analyse multicritère[3] utilisées comme aide à la décision et (iii) phase de construction s'appuyant sur une démarche participative.

Cette démarche a impliqué deux principaux types d'acteurs : (i) des experts scientifiques et techniques, spécialisés dans les domaines de l'évaluation des risques et de l'aide à la décision, issus d'organismes publics de référence nationaux et internationaux, et (ii) des parties prenantes de différents profils d'intérêt, réparties en « collèges » s'inspirant de ceux mis en place lors du « Grenelle de l'environnement » de 2007 : industriels, ONG/associations, élus, État, monde académique et syndicats.

[3] Il s'agit de méthodes et de calculs permettant de choisir la meilleure solution ou la solution optimale parmi un ensemble de solutions potentielles, en considérant plusieurs critères de choix.

Résultats

La méthode générale de hiérarchisation qui a été élaborée se fonde sur deux axes de travail complémentaires :

1. la réalisation d'une analyse multicritère.

Sur la base d'un recensement et d'une analyse préalables des différentes méthodes d'analyse multicritères existantes [168], les méthodes dites « d'agrégation par surclassement de synthèse » sont retenues préférentiellement car elles offrent plusieurs avantages ; elles permettent notamment :

- de décrire assez finement les logiques de décision, par l'intermédiaire de poids entre critères, de seuils de veto, de seuils d'indifférence, de seuils de préférence, etc. [169] ;
- d'agréger des critères de natures différentes (quantitatifs et qualitatifs), sans nécessairement les transformer au préalable en une même grandeur ;
- de considérer que deux substances peuvent être incomparables. Par exemple :
    - si deux substances S1 et S2 ont des profils de performances très différents sur l'ensemble des critères retenus, sans qu'une dominance globale significative ne se dégage ;
    - si S1 domine faiblement S2 pour une majorité de critères, mais que S2 domine très fortement S1 pour un nombre réduit de critères.

  Cette notion d'incomparabilité se traduit graphiquement par l'absence de flèche entre deux substances situées à un même niveau vertical. Ainsi, dans la Figure 11, le benzo[a]pyrène(B[a]P) et le phtalate de di-2-éthylhexyle (DEHP) sont considérés comme incomparables.

Les critères considérés pour comparer les substances sont explicités ; ils dépendent du contexte et de l'objectif de l'exercice de hiérarchisation. Ces critères peuvent être de différents types. Par exemple : sanitaires, environnementaux, technico-économiques, etc.

Chaque point de vue considéré est notamment traduit par un ensemble de poids à affecter aux critères retenus et donne lieu à un ordre de substances[4] spécifique (Figure 11). On parle de « point de vue multicritère ».

2. la construction d'un indicateur qui caractérise le risque collectif[5] (IRC) associé à chaque substance.

Cet indicateur est construit à partir des données disponibles sur les substances étudiées, de résultats de modélisation et de dires d'experts. En première approximation, il matérialise un

[4] Un « ordre de substances » désigne un ensemble hiérarchisé de substances. Comme illustré à la Figure 11, un ordre de substances est représenté par un « arbre ordonné » en deux dimensions, car certaines substances sont identifiées comme incomparables.
Une liste de substances est un cas particulier d'ordre de substances, où toutes les substances ont pu être classées les unes par rapport aux autres.

[5] Nombre de cas (pathologies, décès…) attribuable.

avis d'expert en matière de risque sanitaire dans un contexte de santé publique. Les substances peuvent alors être rangées selon leur valeur respective d'IRC, générant ainsi une liste hiérarchisée monocritère, fondée sur la notion de risque collectif.

Pour éclairer et nourrir leurs réflexions, les décideurs peuvent donc s'appuyer sur plusieurs ordres de substances (Figure 10), accompagnés de leur logique sous-jacente respective, plutôt que sur un ordre unique qui présupposerait un consensus qui n'existe pas.

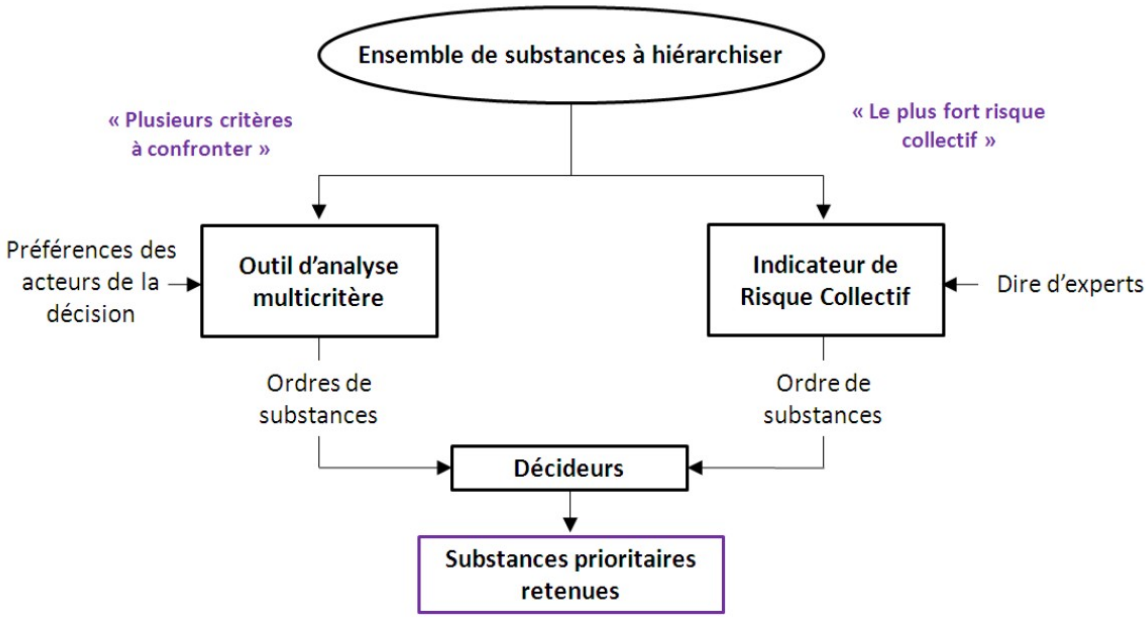


Figure 10 : Schéma présentant l'approche double retenue pour le processus de hiérarchisation de substances préoccupantes

Déroulé séquentiel de la méthode :

- élaboration de l'« univers de substances » - l'ensemble de substances à hiérarchiser - par combinaison de listes existantes de substances prioritaires, complétée par les propositions des parties prenantes du projet ;
- puis, en parallèle :
  - réalisation d'une analyse multicritère (AMC), basée sur une phase de « révélation de préférences » (critères de choix, poids de chaque critère, potentiels vétos, etc.) réalisée auprès de représentants de la société. Cette AMC produit un ordre de substances pour chaque « préférence » (logique de choix, ou encore « point de vue multicritère ») identifiée,
  - calcul d'un indicateur de risque collectif (IRC) pour chaque substance considérée, permettant d'obtenir un ordre de substances (ici monodimensionnel, c'est-à-dire une liste) représentant une logique de santé publique.
- puis, transmission des couples « ordres de substances / logique de choix » aux décideurs pour éclairer leur choix de substances prioritaires.

La mise en œuvre de ces deux axes de travail suppose l'établissement préalable de l'ensemble de substances sur lequel sera réalisé l'exercice. La méthode générale propose de construire cet « univers de substances » par une combinaison de listes hiérarchisées existantes, complétée par une sélection de substances émergentes. Cette construction constitue la phase d'identification des substances les plus préoccupantes, préalable à leur hiérarchisation effective.

Par ailleurs, un exercice de hiérarchisation s'appuie sur les données disponibles caractérisant les substances et leurs effets. Pour chaque exercice, la méthode générale propose que soit

définie une note de qualité (NQ), c'est-à-dire une mesure simple de la disponibilité et de la qualité des données utilisées pour hiérarchiser une substance. Cette note permet d'apprécier la fiabilité du rang obtenu pour une substance dans un ordre, le niveau de confiance associé. En outre, la méthode générale propose également que soit défini un indicateur de perception sociétale (IPS), c'est-à-dire une mesure simple du niveau de préoccupation de la société vis-à-vis d'une substance et de ses effets. Les NQ et les IPS constituent deux types d'informations supplémentaires fournies aux décideurs, en complément des ordres générés : ils ne participent pas au processus de hiérarchisation en tant que tel.

Dans un second temps, une application de la méthode générale a été réalisée, dans le cadre de l'élaboration de la liste de substances prioritaires du futur PNSE3.

Concernant l'analyse multicritère, une phase de « révélations des préférences »[6] a notamment été réalisée, auprès d'un groupe de personnes issues de la société :

- un ensemble d'activités (par exemple : mises en situation de choix, dans différents contextes) a amené les participants à exprimer des informations caractérisant leurs logiques de choix ;
- l'analyse de ces informations a montré que, pour reproduire au mieux les préférences exprimées, ce groupe de personnes devait être considéré comme composé de deux sous-groupes, chacun composé de personnes ayant une logique de choix assez proche. Ces deux logiques de choix ont chacune été traduites avec les critères retenus (Tableau 2).

Tableau 2 : Deux points de vue multicritères identifiés avec des parties prenantes, lors de l'exercice de hiérarchisation préparant le troisième Plan national santé environnement (PNSE3).

Critères	Sélections de poids	
	P_1 (%)	P_2 (%)
Sources anthropiques/naturelles	14	7
Dispersion de l'exposition	3	20
Enjeu groupe sensible	19	4
Risque pour l'environnement	8	9
Risque sanitaire	5	2
Permanence de l'imprégnation dans les milieux	5	11
Danger intrinsèque pour la santé	30	30
Coût et difficulté technique de la réduction des émissions	16	17

En première analyse, le point de vue P1 mettrait en avant la notion de population fragile à protéger des pollutions humaines, alors que le point de vue P2 semblerait plutôt mettre en avant l'ampleur de la population exposée, quelle que soit l'origine de la pollution.

Au final, trois ordres de substances ont donc été fournis aux futurs décideurs : deux ordres issus de l'analyse multicritère (Figure 11) et une liste où les substances sont classées selon leurs valeurs d'IRC.

[6] C'est-à-dire d'explicitation des logiques de choix utilisées de manière préférentielle.

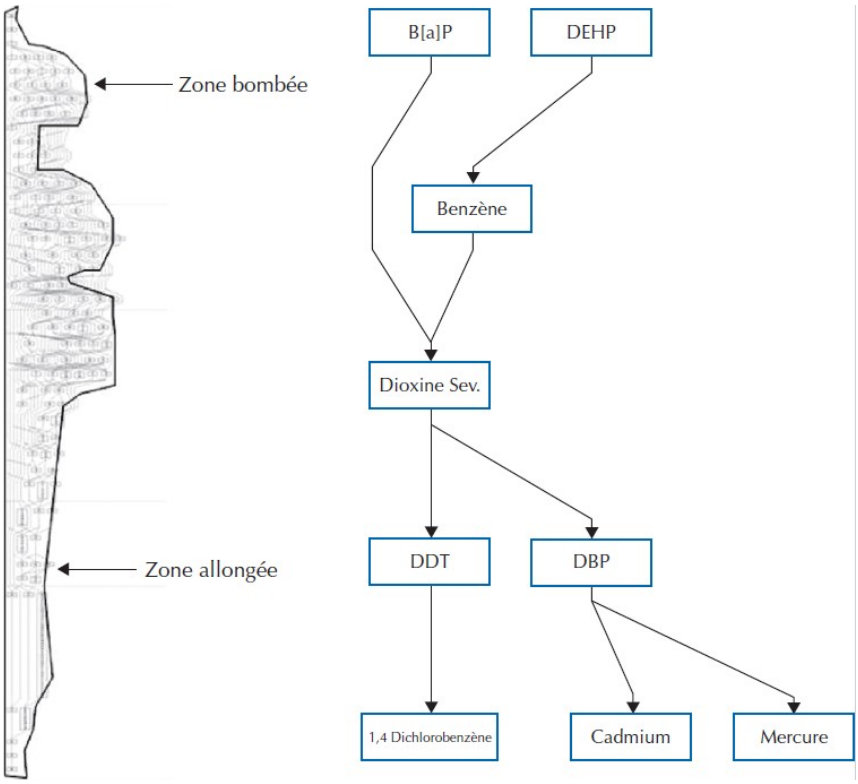


Figure 11 : Exemple d'un arbre ordonné de substances (« ordre de substances »), obtenu à l'aide d'une méthode multicritère

Chaque flèche entre deux substances représente une relation de hiérarchisation. Par exemple, dans l'arbre de cette figure, le DEHP est une substance plus préoccupante que le benzène, au regard de la logique multicritère considérée.
Un arbre de substances présente (à gauche) : des zones allongées, où la hiérarchie entre substances est prononcée ; des zones bombées, où la hiérarchie est moins prononcée : au sein d'une de ces zones, les substances ont un degré de préoccupation relativement proche les unes des autres.
B[a]P : benzo[a]pyrene ; DEHP : phtalate de di-2-éthylhexyle ; Dioxine Sev. : 2,3,7,8-tétrachlorodibenzo-p-dioxine ; DDT : dichlorodiphényltrichloroéthane ; DBP : phtalate de dibutyle.

Discussion

L'originalité de la méthode construite a notamment consisté en :

- l'assemblage de plusieurs outils existants et reconnus, certains n'ayant jamais été utilisés dans le domaine de la gestion des substances toxiques (par exemple : méthodes multicritères par surclassement de synthèse) ;
- l'intégration de différents types d'expertises : évaluation des risques sanitaires, évaluation des risques environnementaux, technico-économie, aide multicritère à la décision, ingénierie de la participation, etc.

En outre, éclairer les réflexions des décideurs avec plusieurs ordres de substances, chacun accompagné de sa logique sous-jacente, contribue à la transparence de l'aide à la décision. Par ailleurs, des ordres de substances pourraient être produits à la demande des décideurs, pour chaque point de vue multicritère qu'ils jugeraient d'intérêt. Si ces points de vue peuvent être exprimés avec les critères retenus, les ordres de substances associés pourront être produits de manière très réactive, par exemple au cours de débats au sein des GT d'élaboration des PNSE. Si ces points de vue nécessitent l'élaboration et le renseignement de nouveaux critères, alors

des compléments d'études seront nécessaires pour produire de nouveaux ordres de substances.

Dans un contexte d'enjeux multiples et de connaissances imparfaites, les décideurs disposent ainsi :

- avant de faire leur choix, d'une formalisation de plusieurs points de vue qui permet, dans une certaine mesure, d'appréhender la diversité des points de vue pouvant être choisis pour répondre à l'objectif retenu [170] ;
- une fois le choix effectué, d'éléments explicites et construits de manière transparente, permettant de contribuer à justifier les raisons de leurs choix, et donc de leur donner plus de cohérence et de robustesse.

Fournir des avis complémentaires à des avis d'experts (IRC) peut paraître ajouter trop de subjectivité dans l'aide à la décision. Néanmoins :

- les décideurs peuvent trouver utile de pouvoir appuyer leur décision sur des aides comportant une part de subjectivité bien explicitée, lorsqu'il n'existe pas de vérité scientifique sur le sujet étudié ;
- la plupart des évaluations comportent, implicitement ou explicitement, une part de subjectivité. Par exemple : le choix du taux d'escompte dans une analyse coût/bénéfice ou le choix des scénarios d'exposition dans une évaluation de risques. S'il est difficile d'être complètement objectif dans une évaluation, alors l'évaluateur doit plutôt s'attacher à expliciter les étapes où de la subjectivité intervient, ainsi que son influence sur les résultats obtenus.

Enfin, la méthode proposée permet également de mettre en synergie les actions de hiérarchisation existantes, (i) en intégrant les résultats de ces actions parmi les listes retenues pour construire l'univers de substances et (ii) en réutilisant les critères explicites de ces actions au sein de l'analyse multicritère.

Valorisation

Ces travaux ont été valorisés par deux publications [171, 172] dans la revue *Environnement Risques & Santé*, qui est la revue associée à la Société francophone de santé et environnement (SFSE). Le texte intégral de ces publications est fourni dans la section intitulée Copies des travaux les plus importants, en fin de manuscrit.

De plus, ces travaux ont également fait l'objet de présentations orales auprès d'organismes ayant manifesté leur intérêt. Par exemple : Anses, IRSN, Colas [173].

En outre, une conférence de presse dédiée a été organisée par l'Ineris à Paris [174].

B.2. Analyse réflexive

Apports liés à la démarche ERS

En matière d'aide à l'élaboration de politiques publiques visant des environnements favorisant la santé, ces travaux ont mis en avant plusieurs caractéristiques intéressantes en lien avec la

démarche ERS. Avec quelques années de recul supplémentaires, voici quelques aspects à enjeux qui me paraissent également importants à souligner.

Démarche participative en amont

Comme l'a mis en avant le *Silver Book*, « *une bonne conception [des ERS] implique de rassembler […] les évaluateurs des risques et diverses parties prenantes au début du processus pour déterminer les principaux facteurs à prendre en considération* » [154]. Cette logique a ici été suivie pour l'ensemble des travaux, et pas uniquement pour les aspects concernant l'IRC.

Sur la base de la demande formulée dans le PNSE2[7], la concertation de parties prenantes en amont de l'étude a permis de valider la pertinence et le fort intérêt pour la question posée pour la préparation du PNSE3, au regard des attentes sociétales. Ceci a été essentiel car, comme l'a souligné un participant plus tard dans le processus d'étude : « *on ne peut pas produire de bonnes réponses quand on a de mauvaises questions* ». La consultation de parties prenantes a également conduit à mettre à jour la sélection de critères initialement proposée, notamment en ajoutant un critère « *Enjeu groupe sensible* » portant sur l'existence de sous-populations présentant des sensibilités particulières à la toxicité de la substance considérée.

Éclairage pluriel

Concernant les décisions complexes, il me semble effectivement plus intéressant de fournir plusieurs éclairages aux décideurs, accompagnés de leur logique sous-jacente, plutôt que de fournir un seul éclairage, qui pourrait laisser penser à l'existence d'un consensus, d'une absence d'alternative pertinente ou d'une vérité absolue qui n'existe pas. Pour paraphraser en miroir le principe *Keep it simple, stupid* (principe KISS), il serait aussi intéressant de considérer le principe *Keep it complex, stupid* [170]. En particulier, éviter l'écueil de trop simplifier les appuis aux politiques publiques permet de mieux décrire la réalité des situations complexes étudiées, et de ne pas restreindre illégitimement les options possibles des décideurs.

Ceci fait écho au traitement des incertitudes, qui est une caractéristique essentielle de la démarche ERS. Dans le processus systématique à appliquer à des centaines de substances que représentait l'IRC, l'introduction de la note de qualité a permis de tenir compte du niveau d'incertitudes en première approche, avec un outil simple et également systématique.

Démarche autonome ou contributrice

Ces travaux ont également permis d'illustrer une forme de flexibilité associée à la démarche ERS : cette démarche peut être utilisée de manière autonome et produire une aide à la décision spécifique, comme pour la liste de substances fondée sur l'IRC ; mais l'ERS peut également être utilisée en articulation avec d'autres aspects à considérer dans le processus de décision, comme cela est le cas dans l'analyse multicritère participative.

Ceci peut même aider à tenir compte des limites actuelles de l'ERS. Par exemple : le critère « Danger intrinsèque pour la santé » a permis de prendre en compte le caractère perturbateur endocrinien (PE), imparfaitement couvert par les VTR actuelles [175, 176].

[7] L'action 5 du PNSE2 demande de « *définir […] une méthodologie d'identification et de hiérarchisation des substances toxiques les plus préoccupantes* ».

En complément, l'élaboration et la cartographie des critères proposés se sont fondées sur la logique du schéma conceptuel (section A.3).

Limites et pistes de progrès

La relecture des travaux de hiérarchisation réalisés a également été l'occasion d'identifier d'autres limites que celles discutées dans les articles correspondants. Sur ce thème également, voici quelques aspects à enjeux qui me paraissent aussi importants à considérer.

Gravité de l'effet critique

Les VTR sont construites sur la base de l'effet critique de la substance considérée, quelle que soit la gravité de cet effet, dans une logique protectrice de la santé. Si ce mode de construction est bien adapté lorsque les ERS visent à démontrer l'absence de situation préoccupante, il représente une limite à la comparaison de substances sur la base de résultats d'ERS : par exemple, un QD égal à 2 pour une irritation oculaire ne représente pas le même degré de préoccupation qu'un QD égal à 2 pour un cancer non génotoxique. Dans une certaine mesure, cette différence peut être appréciée qualitativement au cas par cas, mais pas dans un processus systématique comparant plusieurs centaines de substances. Dans ce cadre, étudier les processus de construction des DALY (*disability-adjusted life years*, nombre d'années en bonne santé perdues) et considérer les éléments qui pourraient être adaptés ou transposés dans un processus de hiérarchisation de centaines de substances pourraient conduire à de futurs travaux contribuant à lever ce verrou méthodologique. Ce verrou porte tout particulièrement sur le mode de construction de l'IRC : en effet, l'analyse multicritère a permis de tenir compte en partie de cette limite, en intégrant un critère « Danger intrinsèque pour la santé » qui est centré sur certains effets classiquement considérés comme faisant partie des plus préoccupants : cancérogénicité, mutagénicité, reprotoxicité (CMR) ; effet perturbateur endocrinien (PE).

Révélations de préférences

Le contenu de la phase de révélations de préférences n'a pas été développé et discuté dans l'article traitant de la méthode générale et, à la réflexion, il me semble que cela manque. Je crois me souvenir que mes co-auteurs et moi avions projeté, à l'époque, d'écrire un article supplémentaire dédié à l'analyse multicritère. Dans tous les cas, en l'état, l'article n'explique pas assez comment les deux séries de poids de critères ont été obtenues en pratique et, compte tenu de l'importance de ces poids dans les résultats obtenus, développer ces aspects aurait été plus cohérent avec le principe de transparence.

Substances émergentes

L'application de la méthode réalisée pour la préparation du PNSE3 me semble mal adaptée aux substances émergentes. En effet, le renseignement des critères retenus (par exemple : Risque sanitaire, Risque pour l'environnement, Enjeu groupe sensible) présuppose que l'évaluateur a déjà à sa disposition un certain nombre d'informations et de résultats d'étude concernant les substances à hiérarchiser. Or les substances émergentes sont, par définition, encore assez peu étudiées : il est donc peu probable que les risques associés aient été quantifiés de manière

raisonnablement robuste, ou que la faisabilité technico-économique de réduire leurs émissions ait été étudiée de manière raisonnablement approfondie, ou encore que des sensibilités particulières aient été identifiées chez certaines populations spécifiques, par exemple. De plus, les substances émergentes peuvent présenter des aspects préoccupants nouveaux ou encore peu considérés, et donc assez mal décrits avec les critères caractérisant les effets plus classiquement considérés et associés à des substances mieux connues ; on peut ainsi penser aux perturbateurs endocriniens, dont les effets différentiels à fortes et faibles doses ont été popularisé dans les années 1990 [177] et aux substances présentant des effets adverses graves sur des cibles multiples (Figure 12). Par conséquent, pour les substances émergentes, les critères peuvent se retrouver principalement renseignés avec des valeurs par défaut[8], ce qui les éloignent du haut des ordres de substances produits.

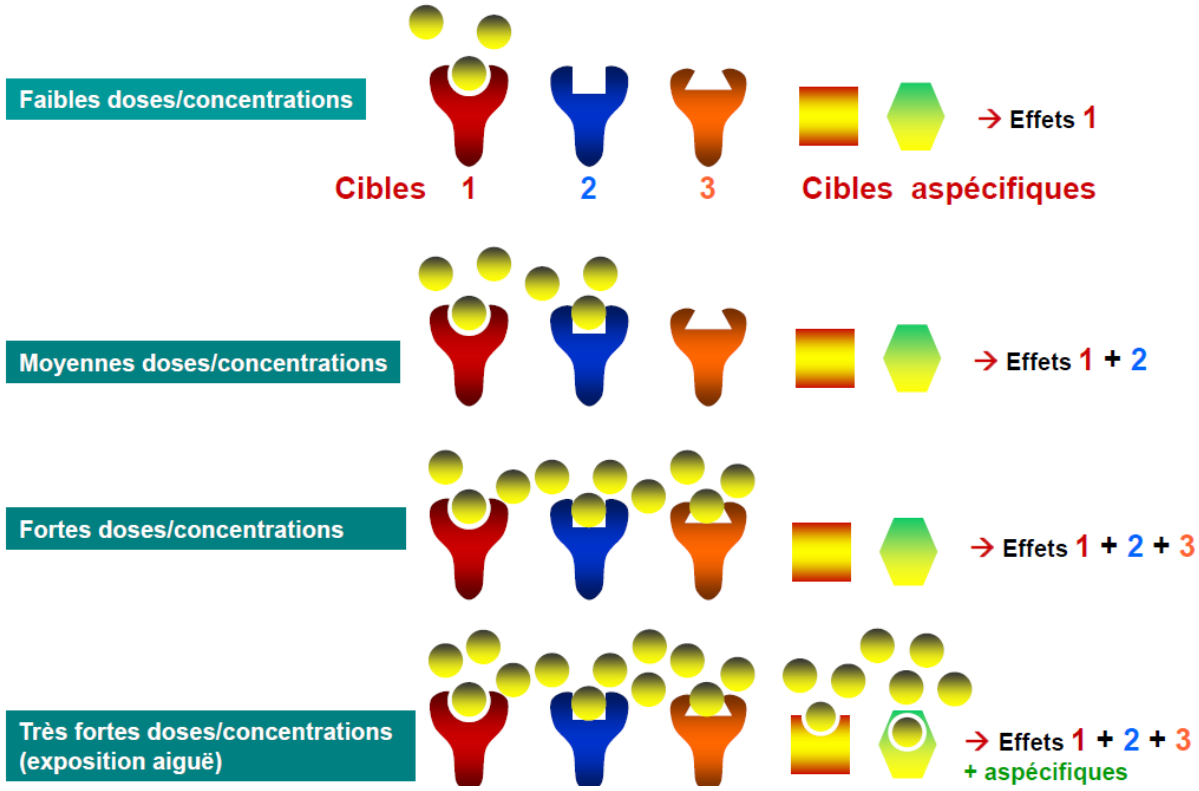


Figure 12 : Illustration de liens possibles entre niveaux d'action et effets de substances toxiques

Les cibles présentent ici des affinités différentes, décroissantes de la gauche vers la droite.

Ces aspects me semblent représenter une différence très significative entre les substances émergentes et les substances plus classiques, qui nécessite donc de réaliser un exercice de hiérarchisation spécifique, à part de l'exercice général. Cet exercice pourrait notamment inclure des critères mieux adaptés aux substances émergentes, comme par exemple leur présence détectée dans certains milieux environnementaux, ou leur proximité de structure chimique avec des substances connues pour leur toxicité (qui est un « proxy » d'intérêt, repris

[8] Une valeur par défaut est définie pour chaque critère. Il s'agit de la valeur retenue lorsque les données disponibles ne permettent pas de déterminer une valeur pour une substance.

par la Commission européenne [178], mais qui présente des limites significatives[9]), ou encore de premiers éléments de preuve concernant un aspect préoccupant et reproduits par une équipe de scientifiques indépendante. Cet exercice pourrait aussi considérer une question mieux adaptée, du type « *quelles sont les substances préoccupantes pour lesquelles des connaissances plus approfondies doivent être acquises prioritairement ?* ».

Au-delà de leur pertinence technique, les critères de l'exercice d'application au PNSE3 ont donc eu pour effet secondaire non voulu de placer en haut des ordres de priorisation, créés à destination des décideurs publics, des substances déjà assez bien connues. Ceci peut être vu comme pertinent au regard de la question qui était posée : en effet, viser la réduction des expositions à certaines substances peut être associé à de forts enjeux économiques, qui peuvent eux-mêmes conduire à un fort impact social (pertes d'emploi, fragilisation de filières professionnelles, etc.), ce qui amène souvent les décideurs publics à requérir des niveaux de preuves significatifs. Néanmoins, sans exercice plus spécifique en complément, ceci pourrait centrer l'intérêt sur un nombre restreint de substances, encore et encore, et ainsi alimenter une sorte d'« effet Matthieu »[10] [179-181] pour les substances préoccupantes : l'approfondissement des connaissances sur les substances déjà bien étudiées est préféré à l'étude de nouvelles substances [97], ce qui notamment ne favorise pas la bonne gestion des « signaux précoces » [182, 183]. En ce sens, le GT « Gestion alerte du risque chimique » de la cnDAspe met en avant l'exemple du bisphénol A (BPA) : « *L'abondante littérature sur le BPA illustre cette asymétrie en comparaison du faible nombre d'études sur les dérivés BPS ou BPF par exemple alors qu'ils sont aussi (sinon plus) toxiques que le BPA* » [184].

Développement de compétences de chercheur

Ces travaux ont été l'occasion de développer ou de renforcer plusieurs compétences types associées aux diplômés du doctorat (Tableau 1). Notamment :

- identifier et résoudre des problèmes complexes impliquant une pluralité de domaines (Bloc 1). Par exemple : évaluation de risques sanitaires et environnementaux, toxicologie, technico-économie, analyse multicritère, ingénierie de la participation ;
- gérer les contraintes temporelles des activités d'études (Bloc 2), avec comme date-butoir le début des travaux des GT d'élaboration du PNSE3 ;
- mobiliser les techniques de communication de données en « open data » pour valoriser des démarches et résultats (Bloc 3), avec la mise à disposition des critères renseignés et de l'IRC pour plus de 300 substances ;
- dépasser les frontières des données et du savoir disponibles par croisement avec différents champs de la connaissance ou autres secteurs professionnels (Bloc 4), ce

[9] Des substances dont la structure est proche peuvent avoir des effets significativement différents. En effet, la présence d'un groupement, même minime, peut changer les équilibres conformationnels et faire apparaitre une conformation qui permet la réaction avec une autre cible. Pour les insecticides par exemple, c'est le cas avec l'éthiprole, dont la structure est proche de celle du fipronil et qui ne présente pas de toxicité pour l'abeille ; à l'inverse, le pyriprole, dont la structure est assez éloignée, présente une toxicité pour l'abeille.

[10] Faisant référence à ce passage de l'Évangile selon Saint Matthieu : « *Car on donnera à celui qui a, et il sera dans l'abondance, mais à celui qui n'a pas, on ôtera même ce qu'il a* ».

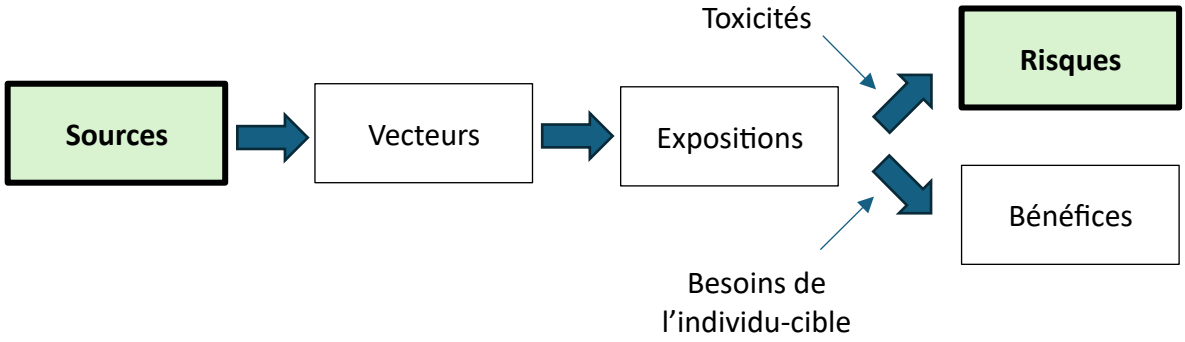
projet ayant mobilisé des experts spécialisés dans les domaines associés aux différents critères retenus ;

- enseigner et former des publics diversifiés à des concepts, outils et méthodes avancés (Bloc 5), avec l'animation d'une formation à un Mastère spécialisé de l'ISIGE ;
- animer et coordonner une équipe dans le cadre de tâches complexes ou interdisciplinaires (Bloc 6) : au-delà des tâches directement liées aux travaux, incluant des experts de différentes unités de l'Ineris et de différents autres organismes publics, la vision transversale acquise au cours de ce projet m'a conduit à être sollicité pour animer la Commission Santé Environnement de l'Association française des ingénieurs et techniciens de l'environnement (AFITE) lors de la période 2012-2013.

C. Qualité de l'air intérieur : caractérisation des enjeux sanitaires liés à certains produits de consommation courante et amélioration de l'information des consommateurs

« *Nous passons en moyenne, en climat tempéré, 85 % de notre temps dans des environnements clos […] dans lesquels nous pouvons être exposés à de nombreux polluants.* »

Ministère chargé de l'Écologie [185]



Building and Environment 206 (2021) 108384

Contents lists available at ScienceDirect

Building and Environment

journal homepage: www.elsevier.com/locate/buildenv

Cleaning product emissions and indoor built environments: Exposure and health risk assessments from experiments under realistic indoor conditions

Guillaume Karr [a,*], Mélanie Nicolas [b], François Maupetit [b], Martine Ramel [a]

[a] INERIS (French National Institute for Industrial Environment and Risks), Verneuil-en-Halatte, France
[b] CSTB (Scientific and Technical Center for Building), Saint Martin D'Hères, France

Received: 9 December 2020 | Revised: 8 July 2021 | Accepted: 6 August 2021
DOI: 10.1111/ina.12923

ORIGINAL ARTICLE

WILEY

Sprays and diffusers as indoor air fresheners: Exposure and health risk assessment based on measurements under realistic indoor conditions

Guillaume Karr[1] | Etienne Quivet[2] | Martine Ramel[1] | Mélanie Nicolas[3]

Article original

Qualité de l'air intérieur et santé : quels sont les produits de consommation présentant les risques individuels les plus élevés ?

Pour citer cet article : Karr G, Ramel M. Qualité de l'air intérieur et santé : quels sont les produits de consommation présentant les risques individuels les plus élevés ? *Environ Risque Sante* 2021 ; 20 : 446-456. doi : 10.1684/ers.2021.1588

Un résumé de ces travaux est proposé ci-après, suivi d'une analyse réflexive. Les textes complets des articles associés sont disponibles en fin de manuscrit, dans la section intitulée Copies des travaux les plus importants, qui débute à la page 156.

C.1. Résumé des travaux

Introduction

Compte tenu que la population générale passe 70 à 90 % de son temps dans des environnements intérieurs, et en particulier dans les logements, la qualité de l'air intérieur représente un enjeu de santé publique important. Dans ce cadre, les sources d'émission se trouvant dans les environnements intérieurs ont besoin d'être mieux caractérisées : quelles sont les substances toxiques émises à l'état gazeux ou particulaire ? Quels sont les risques associés ? Quelles sont les sources présentant les risques les plus élevés ?

L'objectif de ces travaux était double. Tout d'abord, il s'agissait d'évaluer les risques sanitaires par inhalation associés à plusieurs types de produits de consommation courante. Par exemple : encens, bougies parfumées, produits ménagers, sprays désodorisants, diffuseurs de parfums. Ensuite, il s'agissait d'identifier les substances qui contribuent le plus aux risques totaux (multi-substances) calculés pour les produits testés, afin d'appuyer la potentielle mise en place d'un étiquetage portant sur les émissions dans l'air intérieur de ces produits, à l'image de ce qui a été mis en place pour les matériaux de construction et les revêtements (ex : peintures).

En matière de modalités pratiques, ces travaux se sont déroulés entre 2013 et 2021, et ont été réalisés en collaboration avec Martine Ramel (Ineris). Ils ont été l'occasion de collaborations avec des chercheurs d'autres organismes publics, tels que Mélanie Nicolas (Centre scientifique et technique du bâtiment - CSTB) et Étienne Quivet (Aix-Marseille Université, Laboratoire de Chimie de l'Environnement - LCE).

Méthode

Pour évaluer les expositions par inhalation, des scénarios d'exposition génériques - « moyen »[11] et « pire cas raisonnable »[12] (Tableau 3) - ont été élaborés sur la base (i) de sondages nationaux sur les usages, réalisés avec des sociétés spécialisées (Ifop, TNS Sofres), et (ii) de démarches participatives pour les paramètres qui n'ont pas pu être déterminés à l'issue des sondages, avec différents types de parties prenantes. Par exemple : fabricants de produits, associations santé-environnement et de familles, entreprises utilisatrices, particuliers réalisant des séances de ménage à domicile, conseillers médicaux en environnement intérieur (CMEI).

[11] Les scénarios « moyens » ont visé à caractériser les expositions d'un utilisateur dont les pratiques et les caractéristiques environnementales sont courantes, se trouvant dans la moyenne des pratiques et des caractéristiques observées.

[12] Les scénarios « pire cas raisonnable » ont visé à caractériser les expositions d'un utilisateur dont les pratiques et les caractéristiques environnementales majorent raisonnablement l'exposition moyenne. Typiquement, la valeur de chaque paramètre du calcul a été choisie parmi les valeurs hautes des données disponibles, c'est-à-dire majorant le risque calculé, avec comme point de repère approximatif le percentile 90.

Tableau 3 : Scénarios d'exposition génériques élaborés - exemple des utilisateurs de désodorisants non combustibles (sprays et diffuseurs)

Paramètres d'exposition		Utilisateurs de sprays aérosols		Utilisateurs de diffuseurs passifs		Utilisateurs de diffuseurs actifs	
		Moyen	Pire cas raisonnable	Moyen	Pire cas raisonnable	Moyen	Pire cas raisonnable
Fréquence d'utilisation (/jour)	Toilettes	1,5	6	Continu	Continu	-	Continu
	Salon et/ou salle à manger	0,1	2,5	-		0,43	
	Cuisine	0,1	2,5	-		-	
	Hall d'entrée	0,03	1,5	-		-	
	Salle de bain	0,03	1,5	-		-	
	Chambre(s)	0,01	1	-		-	
	Pièce(s) annexe(s)	0,01	0,43	-		-	
Durée d'utilisation		Nombre de pressions		Nombre de mois par an (utilisation continue)		Durée d'une utilisation (min)	Nombre de mois par an (utilisation continue)
		2	4				
		Durée d'une pression		10	11	40	11
		1	2				
Présence dans la pièce pendant et après l'utilisation		Départ après utilisation, puis retour possible au bout de 30'	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Durée d'exposition (années)		70	70	70	70	70	70
Aération manuelle (ouverture sur l'extérieur)		3 fois sur 4 : 10' sur l'extérieur, 20' après utilisation 1 fois sur 4 : pas d'aération	Pas d'aération	Pendant 10' tous les jours	Pas d'aération	Pendant 10', 30' après utilisation	Pas d'aération

Diffuseurs passifs : appareils qui n'utilisent pas de source d'énergie ;
Diffuseurs actifs : appareils qui utilisent au moins une source d'énergie. Par exemple : chaleur produite par combustion ou avec de l'électricité (prise de courant, pile, port USB…).

Dans l'objectif de s'approcher de conditions réelles d'utilisation, les études réalisées se sont fondées sur des produits choisis parmi ceux directement disponibles à la vente, dans des lieux de commercialisation variés. Par exemple : grandes surfaces, magasins spécialisés, sites Internet. Au total, 82 produits ont été étudiés : 29 encens, 9 bougies parfumées, 23 produits ménagers manufacturés, 6 produits ménagers « faits maison » et 15 désodorisants (4 sprays et 11 diffuseurs). Ces produits ont été testés au sein d'une maison expérimentale [186], afin d'obtenir des concentrations mesurées dans des conditions réalistes.



Figure 13 : Maison expérimentale MARIA du CSTB (Champs-sur-Marne) [187]

Sur la base des différentes composantes des scénarios d'exposition élaborés, les concentrations mesurées ont été extrapolées à des concentrations moyennes journalières, puis à des concentrations moyennes inhalées, afin de caractériser les expositions chroniques par inhalation.

Résultats

Des indicateurs de risques ($QD_{chroniques}$, ERI, QD_{aigus}) ont été calculés pour chaque substance émise par chaque produit testé, lorsque les données de toxicité disponibles le permettaient. Plusieurs dépassements des valeurs repères usuelles d'acceptabilité ont été obtenus, ce qui suggère un besoin de réduire les expositions liées à ces produits. Les substances principales contributrices aux risques calculés sont le benzène, l'acroléine et le formaldéhyde.

Concernant les particules fines ($PM_{2,5}$), qui incluent ici des particules ultrafines (PUF ou $PM_{0,1}$), les tests effectués sur plusieurs produits ont conduit à des concentrations horaires moyennes supérieures à 100 µg/m^3 (encens, sprays désodorisants).

Discussion

D'une manière générale, concernant les produits de consommation, la littérature scientifique présente peu d'évaluations de risques sanitaires. De plus, la plupart de ces études se fonde sur des données d'usage générique, par type de produit et par type de pièce, ainsi que sur des essais dans de (petites) chambres d'essais d'émission en laboratoire. Face à ces limites des connaissances du moment, les évaluations réalisées ont été les premières à se fonder sur des mesures en conditions réalistes et sur des scénarios d'exposition élaborés à l'aide de sondages nationaux (fournissant des données d'usage représentatives et spécifiques).

Ces résultats ont contribué à faire progresser les connaissances dans un domaine présentant de forts enjeux pour la population générale. En particulier, les sondages réalisés sur les usages indiquent que de nombreuses personnes n'ont pas conscience que des produits de consommation courante peuvent émettre des substances préoccupantes. Par exemple, en France, 58 % des utilisateurs d'encens déclarent que cette pratique soit améliore[13], soit n'a pas d'effet sur la qualité de l'air intérieur, et 27 % d'entre eux brûlent de l'encens dans l'objectif d'« assainir »[14] l'air intérieur [188].

Certaines pratiques religieuses ou traditionnelles pourraient conduire à une forte utilisation d'encens. Par exemple : des pratiques bouddhistes. Ces pratiques n'ont pas été considérées dans les travaux réalisés et pourraient faire l'objet d'études complémentaires, probablement associées à de forts enjeux sanitaires individuels.

Valorisation

Ces travaux ont été valorisés par trois publications dans trois journaux différents : *Indoor Air* [41] (premier quartile pour les domaines Building and Construction, Environmental Engineering et Public Health, Environmental and Occupational Health), *Building and Environment* [42] (premier quartile pour les domaines Building and Construction et Environmental Engineering) et *Environnement Risques & Santé* [43].

De plus, ces travaux ont été présentés lors de journées techniques nationales (Rencontres scientifiques « Recherche sur l'air » (Ademe-Anses), colloques de restitution des projets de recherche PRIMEQUAL et CORTEA (Ademe), Assises nationales de la qualité de l'air (Ademe - ministère chargé de l'Écologie) et à trois reprises lors de l'*International Conference on Indoor Air Quality and Climate* (dite conférence « Indoor Air ») [37-39], la conférence internationale de référence dans le domaine de la qualité de l'air intérieur.

En outre, les résultats obtenus ont été présentés et discutés avec des représentants d'associations lors d'une rencontre « Ineris - Société civile » en 2016, portant sur « *les enjeux sanitaires liés à l'utilisation de produits de consommation* » [189]. Par ailleurs, des bonnes pratiques permettant de réduire les expositions ont été diffusées sur le site du ministère de l'Écologie [190, 191] et au niveau de guides pratiques [32, 192, 193]. Enfin, les connaissances acquises ont été transmises au sein d'une formation, intitulée *RC15 Qualité de l'air intérieur :*

[13] Au sens de diminuer la présence de polluants et d'ajouter des substances associées à des bénéfices supposés.

[14] Au sens de diminuer la présence d'agents toxiques.

mieux connaître les expositions et les risques et disponible dans le catalogue d'Ineris Formation [194].

C.2. Analyse réflexive

Apports liés à la démarche ERS

En matière d'aide à l'élaboration de politiques publiques visant des environnements favorisant la santé, ces travaux ont mis en avant plusieurs caractéristiques intéressantes en lien avec la démarche ERS. Avec quelques années de recul supplémentaires, voici quelques aspects à enjeux qui me paraissent également importants à souligner.

Gestion du manque de données

La démarche ERS s'applique souvent dans un contexte d'incertitudes, qui peut se caractériser par le manque de certaines informations importantes pour l'évaluation et spécifiques à la situation étudiée. Pour gérer au mieux ce contexte, l'évaluateur s'appuie notamment sur les principes généraux présentés à la section A.3, sur l'objectif de l'étude (assurer l'absence de situation préoccupante ? Identifier les principaux contributeurs aux risques ? Autres ?) et sur plusieurs options classiques :

- le choix de valeurs réglementaires, qui peuvent indiquer des ordres de grandeur raisonnablement protecteur, en première approche. Par exemple : certaines valeurs limites d'émission (VLE) fixées par l'arrêté du 2 février 1998 modifié, relatif aux émissions des ICPE soumises au régime d'autorisation ;
- le choix de valeurs indiquées dans des guides méthodologiques de référence pour les ERS. Par exemple : le guide ICPE indique un nombre d'années d'exposition de 30 ans pour l'évaluation des expositions des populations habitant à proximité d'ICPE ;
- des inférences justifiées à partir des données existantes, au cas par cas. Cette option peut apparaître plus « scientifique » mais peut présenter une certaine variabilité selon les experts en présence, ce qui peut prêter à débat.

À défaut, l'évaluateur peut aussi s'appuyer sur la notion de « raisonnable consensus » parmi les personnes familières du sujet étudié.

Les travaux réalisés ont été l'occasion d'illustrer cette dernière option. Face à l'impossibilité d'élaborer des scénarios d'usages à partir des résultats du sondage national sur l'utilisation de produits ménagers (à cause d'incohérences significatives, incluant des sur-déclarations manifestes), des séances de ménage ont été élaborées en s'appuyant sur les données incomplètes disponibles dans la littérature scientifique et sur une concertation de parties prenantes de profils et de compétences variés. Par exemple : fabricants de produits ménagers, société de prestations de ménage à domicile, particuliers réalisant des séances de ménage à domicile, associations de famille, associations santé-environnement, etc. Les différents éléments de cette phase de concertation, dont le questionnaire initial (ancrage cohérent avec les données de la littérature) et les réponses reçues, ont été tracés, transmis aux participants et rendus publics. À notre connaissance, les choix retenus n'ont pas fait l'objet de débats, alors même que les potentiels enjeux sanitaires liés aux produits ménagers ont été mis en avant dans le PNSE4 [109] et font régulièrement l'objet d'articles et de reportages dans les médias.

Si une telle démarche était à refaire aujourd'hui, je pense que je m'y prendrais un peu différemment en termes de gestion des liens d'intérêt, notamment au regard de ce que j'ai pu apprendre par la suite en travaillant sur le sujet (section F). L'idée principale était d'interroger plusieurs types de parties prenantes pour obtenir l'avis d'une pluralité de profils d'intérêts, et ainsi d'éviter une influence disproportionnée de certains intérêts particuliers. Dans la même logique, afin de réduire le risque d'avoir à considérer des valeurs aberrantes, pour chaque type de parties prenantes, plusieurs personnes ont été sollicitées. Si ce principe général me paraît toujours pertinent aujourd'hui, je crois que la mise en œuvre de la démarche aurait gagné à être plus formalisée et mieux présentée aux parties prenantes sollicitées : transmission de supports de présentation du projet (problématique, objectifs, méthode, etc.), apport de preuves que le financement et le pilotage ne présentent pas de liens d'intérêt (section F), appel téléphonique préliminaire pour répondre aux questions sur le projet et sur la sollicitation (avant un second appel dédié à cette sollicitation scientifique et technique), etc. Par exemple, j'ai le souvenir que les représentantes de l'association Women Engage for a Common Future (WECF) était initialement assez réticentes à répondre à mes questions, car elles souhaitaient avoir plus d'informations préalables (sur les différentes sollicitations prévues, sur le traitement des informations et l'exploitation des avis issus de l'échange…) et, il me semble, être rassurées quant à l'utilisation de la mention « WECF » dans la validation et la valorisation des travaux.

La question de faire remplir des déclarations publiques d'intérêt (DPI) aux participants peut être posée. Néanmoins, il me semble que ces sollicitations se sont rapprochées d'auditions assez classiques, telles qu'elles peuvent être menées à l'Anses ou au HCSP par exemple. Ces auditions ne requièrent pas le renseignement de DPI par les personnes auditionnées, et le principe de proportionnalité me semble ici devoir aussi tenir compte de l'ampleur de la disponibilité (bénévole) qui peut être accordée par des personnes extérieures au projet.

À mes yeux, une amélioration potentielle de l'exercice porte sur le type de résultats produits : des séances de ménage alimentant des scénarios déterministes de type « moyen » et « pire cas raisonnable ». Plutôt que de poser des questions sur des valeurs de paramètres d'usage (par exemple : le temps d'utilisation de tel produit dans telle pièce de maison), je crois qu'il aurait été encore plus utile d'orienter les réponses des interviewés vers des intervalles associés à des niveaux de confiance. Par exemple : « *je pense que c'est raisonnablement possible entre telle et telle valeurs ; je pense que c'est probable entre telle et telle autres valeurs, je pense que le plus probable est autour de cette valeur particulière* ». Cette approche, dite « possibiliste » [195, 196], permet de mieux profiter de l'expérience des interviewés et, dans le cadre du traitement des incertitudes, de réaliser des études de sensibilité simples.

Priorisation de mesures de gestion

Ces travaux ont aussi été l'occasion d'illustrer comment la démarche ERS peut aider à hiérarchiser les enjeux sanitaires en présence, en appui à la gestion des risques dans le cadre du PQAI (intégré au PNSE 3). En particulier, l'interprétation des résultats ne s'est pas limitée à une comparaison avec les valeurs usuelles sur lesquelles s'appuient les critères d'acceptabilité (QD = 1 ; ERI = 10^{-5}) (Tableau 4) : puisque des indicateurs de risque ont été calculés pour chaque substance émise par chaque produit, il a été possible d'identifier (i) les types de produits correspondant aux risques le plus élevés et (ii) les substances qui contribuent le plus aux risques calculés.

Ce premier type d'exploitation peut contribuer à orienter certaines bonnes pratiques visant à réduire les expositions préoccupantes. Par exemple, sur la base des résultats obtenus avec ces travaux, le ministère de l'Écologie a pu recommander de privilégier les fins bâtonnets d'encens aux cônes et aux gros morceaux de résine[15] [190] ; ou encore d'éviter les produits ménagers sous forme de vaporisateurs [32]. En complément, ces résultats par produit ont permis d'identifier les produits de consommation associés aux plus forts enjeux sanitaires : au regard du nombre de dépassements de valeurs repères usuelles obtenus, de leur ampleur et de la gravité des effets critiques associés, les encens peuvent être considérés comme les produits de consommation associés aux risques les plus élevés ; viennent ensuite les sprays désodorisants, avec un second niveau de priorité.

Tableau 4 : Comparaison des expositions évaluées en fonction des produits testés - illustration avec l'exemple du formaldéhyde

Types et nombres de produits pour chaque étude réalisée	Formaldéhyde							
	Expositions chroniques				Expositions aiguës			
	Min.	Max.	Med.	Moy.	Min.	Max.	Med.	Moy.
20 encens	$2{,}5.10^{-1}$	2,3	$5{,}8.10^{-1}$	$7{,}6.10^{-1}$	$1{,}1.10^{1}$	$7{,}0.10^{1}$	$2{,}8.10^{1}$	$3{,}3.10^{1}$
9 encens	4.10^{-1}	1	$8{,}2.10^{-1}$	$7{,}8.10^{-1}$	$1{,}2.10^{1}$	$9{,}6.10^{1}$	$5{,}7.10^{1}$	$5{,}6.10^{1}$
9 bougies parfumées	$5{,}1.10^{-1}$	5,1	1,6	2,0	3,1	$5{,}6.10^{1}$	$2{,}2.10^{1}$	$2{,}3.10^{1}$
19 produits ménagers manufacturés	0,0	$1{,}2.10^{1}$	$6{,}1.10^{-1}$	1,3	0,0	$1{,}4.10^{2}$	$2{,}5.10^{1}$	$4{,}1.10^{1}$
4 produits ménagers manufacturés	0	$1{,}2.10^{1}$	$2{,}3.10^{-1}$	2,6	0,0	$6{,}0.10^{1}$	3,8	$1{,}6.10^{1}$
6 produits ménagers faits maison	0	3,8	1,4	1,7	0,0	$7{,}9.10^{1}$	$1{,}9.10^{1}$	$2{,}8.10^{1}$
4 sprays aérosols	$3{,}1.10^{-1}$	$5{,}2.10^{1}$	$3{,}7.10^{1}$	$3{,}0.10^{1}$	$9{,}2.10^{-1}$	$2{,}3.10^{2}$	$1{,}1.10^{2}$	$1{,}1.10^{2}$
6 diffuseurs passifs	$8{,}6.10^{-3}$	$5{,}7.10^{1}$	2,2	$1{,}3.10^{1}$	$5{,}6.10^{-2}$	$3{,}7.10^{2}$	$1{,}5.10^{1}$	$8{,}4.10^{1}$
5 diffuseurs actifs	0,0	$4{,}5.10^{1}$	5,3	$1{,}0.10^{1}$	0,0	$2{,}9.10^{2}$	$3{,}2.10^{1}$	$6{,}1.10^{1}$
Campagne nationale logement (OQAI)	Médiane : 19,6 - Percentile 95 : 46,7							
Concentrations de fond dans les logements européens (retenues pour le projet EPHECT)	Minimum : 4 - Maximum 57 - Moyenne : 22							

Expositions chroniques : concentrations moyennes inhalées (CI, µg/m^3) ; Expositions aiguës : concentrations horaires maximales (µg/m^3) ; Min. : valeur minimale ; Max. : valeur maximale ; Med. : valeur médiane ; Moy. : valeur moyenne.

La contribution de chaque composante considérée dans la démarche ERS peut ainsi être explicitée et donner lieu à des interprétations utiles. Par exemple, puisque des séances de ménage multi-pièces ont été considérées dans les travaux sur les produits ménagers, il aurait été possible de hiérarchiser les pièces de maison en fonction des risques associés. De plus, l'interprétation par substance des résultats obtenus permet d'identifier les substances principales contributrices aux risques calculés : ceci est notamment utile pour alimenter les réflexions sur un potentiel étiquetage de ces produits et portant sur leurs émissions dans l'air intérieur ; ces substances pourraient donc être celles à inclure prioritairement dans le système de classement associé. De plus, afin de tester différentes bornes pour les classes d'émissions correspondant aux différents niveaux d'étiquetage[16], les données issues des travaux réalisés pourront être utilisées pour observer comment se répartiraient les différents produits testés parmi les classes, ce qui permet donc d'avoir une première idée du caractère discriminant des

[15] Cette recommandation est liée aux niveaux d'émissions plus importants trouvés dans les mesures réalisées, et que l'on peut expliquer par la masse à brûler associée et par le niveau de complétude ou d'incomplétude de la combustion correspondant à ces différents formats. Néanmoins, la composition des encens, au-delà de leur format, influence également la composition des émissions, et donc les niveaux de risques associés.

[16] Par exemple quatre classes, de A+ à C ; ou bien cinq classes, de A à E, comme pour le nutri-score

bornes considérées. Enfin, avoir inclus les risques aigus dans la démarche ERS a pu apporter un éclairage différent et complémentaire à celui issu de l'étude des risques chroniques, en matière de gestion des risques : lorsque ces derniers concluent au besoin de réduire certaines expositions, plusieurs mesures de gestion peuvent être envisagées ; par exemple : mettre en œuvre des campagnes de communication pour sensibiliser la population générale à certaines bonnes pratiques de réduction des expositions, telle qu'une aération journalière du logement. Mais lorsque des risques aigus dépassent également le critère d'acceptabilité, alors les mesures de gestion envisagées doivent inclure une réduction des émissions. De plus, si seuls les produits les plus émissifs sont associés à des dépassements de valeurs repères usuelles, cela suggère qu'une réduction des émissions peut être obtenue en travaillant sur la composition des produits.

Différents niveaux d'approfondissement

Ces travaux ont été également l'occasion d'illustrer la flexibilité de la démarche ERS au regard du principe de proportionnalité. En effet, les produits de consommation courante testés ont été sélectionnés à partir d'études préalables, où la démarche ERS a également été mise en œuvre : à partir de données d'émissions collectées avec une revue de littérature scientifique [197], des modèles d'exposition simples (Targeted Risk Assessment [TRA] et Consumer Exposure [ConsExpo]) ont été utilisés pour calculer des indicateurs simples, fondés sur la logique d'élaboration des QD et des ERI [198, 199]. Dans un premier niveau d'approche, les indicateurs obtenus ont permis d'identifier des substances d'intérêt prioritaire, pour chaque produit de consommation considéré, et d'évaluer des ordres de grandeur pour les niveaux de risques individuels attendus [198]. Ces premiers résultats ont permis de hiérarchiser les besoins d'études plus détaillées, en donnant la priorité aux produits de consommation pour lesquels les plus forts risques individuels étaient attendus, et en visant notamment à approfondir les risques liés aux substances d'intérêt prioritaire identifiées.

Cet exemple montre que la démarche ERS peut être déclinée avec un premier niveau d'approche, ici sur la base de données bibliographiques et de modèles simples, afin d'obtenir un processus systématique simple, applicable à un grand nombre de produits et de substances. Ce processus permet de prioriser les études approfondies à mener, en fonction des risques sanitaires attendus. Ce type de processus est transposable à d'autres domaines, et peut être vu comme une déclinaison du principe de proportionnalité (section A.3).

Limites et pistes de progrès

La relecture des évaluations de risques réalisées a aussi été l'occasion d'identifier d'autres limites que celles discutées dans les articles correspondants. Sur ce thème également, voici quelques aspects à enjeux qui me paraissent aussi importants à considérer.

Qualité des environnements intérieurs

Les travaux réalisés ont considéré les enjeux sanitaires liés à la qualité de l'air intérieur. Or la qualité des « environnements intérieurs » [200] présentent aussi des enjeux sanitaires liés aux poussières, et notamment aux poussières domestiques. En particulier, des composés organiques semi-volatils (COSV) sont classiquement adsorbés sur ces poussières, et les expositions correspondantes ont besoin d'être réduites [201, 202].

Une partie de ces expositions est attribuable à certains produits de consommation courante : étudier les produits qui en sont les principaux contributeurs et évaluer les enjeux sanitaires liés à leurs émissions pourraient donc apporter des éclairages utiles aux gestionnaires des risques.

L'approche retenue dans les travaux réalisés pour la qualité de l'air intérieur - combinant successivement pré-hiérarchisation des produits, sondages de niveau national sur les usages, mesures en conditions réalistes et évaluations quantitatives des risques sanitaires - pourrait être déclinée aux produits émetteurs de COSV classiquement mesurés dans les environnements intérieurs [203] : pesticides, retardateurs de flamme, phtalates, etc.

Élargir le champ des travaux aux COSV ouvrirait sur l'étude de familles classiques de substances, incluant des perturbateurs endocriniens, comme celles citées plus haut. Dans ce cas, plus encore que pour les COV, la question de la caractérisation de la toxicité des substances étudiées serait probablement un défi pour certaines substances, car les VTR actuelles couvrent mal les perturbations du système endocrinien [175, 176]. Dans un premier temps, une appréciation qualitative pourrait être réalisée en complément des calculs de QD et d'ERI, par exemple en se fondant sur les différents niveaux de preuves fournis par la *Database of Endocrine Disrupting Chemicals and their Toxicity profiles* (DEDuCT) [204, 205].

Sélection de VTR

Le processus de collecte et de choix de VTR pour les substances mesurées n'est pas indiqué dans les articles publiés, ce qui aurait pu être un aspect intéressant à développer et à discuter. Compte tenu du grand nombre de substances mesurées dans l'air de la maison expérimentale (plusieurs centaines au total), un processus de collecte et de choix à la fois systématique et simple a été retenu, en se fondant notamment sur les lignes directrices décrites dans la Note d'information n° DGS/EA1/DGPR/2014/307 du 31 octobre 2014 [164], élaborées par la Direction générale de la santé (DGS) et par la Direction générale de la prévention des risques (DGPR). Ce processus systématique comprend les étapes suivantes :

- le recensement et le choix, en priorité, des VTR et des valeurs guides de qualité d'air intérieur (VGAI)[17] [206] élaborées par l'Anses ;
- la consultation, à défaut, de six bases de données exploitées par les organismes suivants : Agence américaine de protection de l'environnement - USEPA ; Agence américaine des substances toxiques et du registre des maladies - ATSDR ; Organisation mondiale de la santé - OMS ; Ministère fédéral canadien pour la santé - Santé Canada ; Institut national de santé publique des Pays-Bas - RIVM ; Bureau américain pour l'évaluation des dangers en santé environnementale - OEHHA.

[17] Les VGAI sont élaborées par un groupe d'experts pluridisciplinaire, en utilisant des principes méthodologiques proches de ceux utilisés pour l'élaboration des VTR.

À l'issue de la consultation de ces bases, plusieurs VTR ont pu être recensées pour une même substance, pour les mêmes voie et durée d'exposition, ainsi que pour le même type d'effet. Dans ce cas :

- Si une expertise nationale (Anses, Ineris…) a été réalisée, postérieurement à la date de parution de la VTR la plus récente, et recommande un choix de VTR, alors ce choix a été retenu pour les travaux.
- Si aucune recommandation de l'Anses ou de l'Ineris n'est disponible pour la substance étudiée, alors :
  - la VTR retenue est la VTR la plus récente parmi celles des bases de l'USEPA, de l'ATSDR et de l'OMS ;
  - si aucune VTR n'a été trouvée à ce stade, alors la VTR retenue est la VTR la plus récente parmi celles des bases de Santé Canada, du RIVM et de l'OEHHA.

À ce stade, moins d'un quart des substances mesurées dans la maison expérimentale pouvaient être caractérisées par une VTR. Par conséquent, à titre indicatif, d'autres valeurs de référence ont été collectées pour caractériser la toxicité des substances sans VTR : les concentrations limites d'intérêt (CLI).

Les CLI sont construites dans le cadre de caractérisations des émissions de certains produits de consommation courante : produits de construction et de revêtement, meubles, etc. Pour les présents travaux, les CLI retenues ont été celles construites (i) lors de travaux récents de l'Anses [147] ; (ii) par le Groupe de travail sur les CLI européennes (EU-LCI Working Group) de la Commission Européenne [207, 208], auquel l'Anses participe. Les CLI n'ont pas le statut de VTR [164]. Néanmoins, leur méthode de construction est proche de celle des VTR à seuil [209, 210] : elles constituent donc des références d'intérêt, qui peuvent être mises en regard des expositions calculées, à titre d'information complémentaire.

Concernant les substances pour lesquelles aucune VTR chronique ni aucune CLI n'était disponible parmi les sources précitées, d'autres valeurs de référence ont été collectées : les valeurs guides d'air intérieur allemande, construites par l'*Ausschuss für Innenraumrichtwerte* (AIR, Comité pour des valeurs guides de l'intérieur) [211].

Au global, malgré ce processus élargi de collecte et de choix, la toxicité de moins de la moitié des substances étudiées a pu être caractérisée par une valeur de référence, ce qui constitue donc une limite significative des quantifications de risques réalisées. Dans ce contexte, les substances correspondant aux expositions les plus fortes ont été transmises par le ministère chargé de l'Écologie à l'Anses, en tant que propositions pour le programme de travail de l'agence portant sur l'élaboration de nouvelles VTR.

Mélanges de substances

Les évaluations réalisées par substance puis par produit ont également été l'occasion d'illustrer comment la problématique des expositions aux mélanges de substances peut être traité dans une démarche ERS. Bien que ces mélanges soient peu fréquemment considérés dans les critères d'acceptabilité des résultats d'ERS [162], certains guides méthodologiques de référence recommandent de caractériser les risques associés aux mélanges, afin de fournir un éclairage complémentaire au gestionnaire du risque [52]. Cette caractérisation peut être

réalisée en effectuant une somme « multi-substances » des indicateurs de risques calculés pour chaque substance, potentiellement affinée par organe cible et par mécanisme de toxicité, puis en comparant les sommes obtenues aux valeurs repères usuelles [52, 55]. Cette somme des « expositions pondérées par leur niveau de toxicité » correspond aux pratiques usuelles des évaluateurs de risque, depuis de nombreuses années [151, 156]. Ainsi, selon le guide ICPE, « *pour les mélanges de dioxines, de furanes et de PCB-dioxine like, ainsi que pour les effets sans seuil des HAP, des facteurs d'équivalence toxique ont été définis par des instances d'expertise nationales ou internationales (ONU, OCDE) et sont couramment utilisés* » [52], permettant d'exprimer les résultats notamment en équivalents toxiques internationaux (TEQ, I-TEQ) [212].

Ces pratiques sont appuyées par le contenu actuel de la littérature scientifique [65, 213]. En ce sens, l'Anses indique : « *Le modèle de l'additivité, basé sur l'absence a priori d'interactions, considère que chaque substance du mélange n'a pas d'influence sur la toxicité des autres constituants. Si ce modèle est simpliste au regard de la réalité des mécanismes toxicologiques, il reste dans la plupart des cas plausible pour les expositions environnementales à faibles ou très faibles doses. Les études indiquent généralement que ce modèle prédit raisonnablement la toxicité des mélanges ayant des mécanismes d'action communs. Même si on peut observer des écarts entre réponses prédites et observées, elles restent d'une manière générale faibles (facteur 1 à 3). Ainsi, il est fait l'hypothèse qu'aux faibles doses une interaction (synergie ou antagonisme), si elle se produit, reste peu susceptible de générer un résultat très différent de l'additivité au regard des incertitudes inhérentes à la démarche même d'évaluation des risques. Ce modèle d'additivité est recommandé par les institutions d'évaluation des risques […]. Pour autant, les connaissances actuelles sur les mélanges ne permettent pas de vérifier l'absence d'interactions dans tous les cas de figures : peu d'études ont été réalisées aux doses environnementales avec des mélanges représentatifs des expositions réellement rencontrées sur le terrain. L'hypothèse d'additivité est utilisée par défaut, sauf si des données disponibles dans la littérature la remettent en cause* » [214].

Dans les travaux réalisés, des sommes multi-substances d'indicateurs de risque (par exemple : $QD_{formaldéhyde}$ + $QD_{acétaldéhyde}$ + $QD_{acroléine}$ + etc.) ont été effectués par produit, puis des sommes multi-produits (qui pourraient, plus généralement, être désignées par « multi-sources » ; par exemple : $QD_{nettoyant\text{-}sol}$ + $QD_{nettoyant\text{-}SdB}$ + $QD_{nettoyant\text{-}vitres}$ + etc.) ont été effectuées en complément, afin de caractériser les risques liés à une séance de ménage complète. Pour les effets à seuil, ces sommes auraient pu être affinées par organes cibles ; néanmoins, dans un premier niveau d'approche, il a été jugé que la grande majorité des substances considérées pouvaient perturber le bon fonctionnement du système respiratoire.

Une autre manière de caractériser les effets des mélanges, qui pourrait donner lieu à des compléments d'études, serait d'utiliser les valeurs de toxicité produites par l'Anses pour certains mélanges d'intérêt, qui n'étaient pas disponibles au moment de la réalisation des travaux. Par exemple, la VGAI élaborée par l'Anses pour les substances irritantes [215] pourrait être appliquée aux expositions calculées pour de nombreuses substances émises par les produits de consommation courante testés.

D'une manière générale, pour des travaux portant sur plusieurs dizaines de produits et sur plusieurs centaines de substances, une approche simple et pragmatique s'avèrerait utile pour rendre l'exercice plus gérable en pratique. En ce sens, un facteur d'évaluation de mélange (de l'anglais *mixture assessment factor* (MAF)) pourrait être intégré dans le calcul d'indicateurs pour les substances individuelles, en cohérence avec la Stratégie européenne pour la durabilité des substances chimiques de 2020 [178]. Dans cette logique, par exemple pour la voie

d'exposition par ingestion, la dose journalière d'exposition (DJE) de la substance étudiée pourrait être ainsi remplacée par « DJE x MAF » dans le calcul des QD et des ERI (Figure 6) ; ceci traduirait que l'exposition considérée intègre le cumul des contributions des autres substances au risque total, notamment les contributions des substances ayant le même mécanisme d'action et le même organe cible. En permettant de se rapprocher de l'exposition « réelle », intégrant l'exposition de fond et l'exposition attribuable à la source étudiée, ce facteur corrigerait, en quelque sorte, pour le cumul des expositions avec d'autres substances. En ce sens, dans son rapport de capitalisation portant sur la santé environnementale, l'IGAS recommande aux pouvoirs publics de « *demander à la Commission européenne d'introduire rapidement un facteur de sécurité additionnel dans l'évaluation des risques pour tenir compte des multi-expositions* » [216].

Afin de choisir une valeur de MAF, une revue de littérature serait nécessaire en amont de futurs travaux en ce sens, de préférence en collaboration avec un toxicologue. Je comprends que, à ce stade, des propositions discutées sont de l'ordre de 10 à 100 pour le MAF ; ceci traduirait, en première approximation, la présence d'une dizaine ou d'une centaine d'autres substances qui ont un effet similaire, conduisant à un cumul des contributions de chaque substance au risque total. Ce processus simple et systématique permet d'avoir une solution opérationnelle de première approche, en l'absence d'estimation rigoureuse des cumuls potentiels avec ces autres substances.

Mesures de gestion

En complément des conclusions directement issues des résultats de la démarche ERS - par exemple : un besoin de diminuer les expositions de la population générale - les évaluateurs peuvent indiquer et décrire un ensemble de mesures de gestion susceptibles d'y répondre. À titre indicatif, pour des produits de consommation courante, ces mesures de gestion pourraient inclure les suivantes.

- Mettre en œuvre des campagnes de sensibilisation à de bonnes pratiques d'utilisation, auprès de la population générale et plus particulièrement des consommateurs.
  Par exemple : privilégier des pièces de grand volume et bien ventilées lors de l'utilisation ; privilégier un usage modéré, notamment en évitant d'utiliser plusieurs produits simultanément et en limitant la fréquence d'utilisation (en particulier, éviter l'utilisation continue) ; privilégier les produits les moins émissifs (le cas échéant, avec un étiquetage portant sur les niveaux d'émission) ; éviter l'inhalation directe des émissions, par exemple en évitant de se placer à proximité immédiate d'un encens en cours d'utilisation ; éviter l'utilisation lorsque des personnes sensibles se trouvent dans la pièce comme, par exemple, les bébés, les enfants, les personnes souffrant de troubles respiratoires et les femmes enceintes.
- Mettre en place un étiquetage réglementaire fondé sur les émissions des produits.
  Ce type d'étiquetage permettrait d'informer les consommateurs sur le caractère préoccupant de la toxicité des substances émises et sur leur niveau d'émission. La forte variabilité des émissions mesurées suggère qu'il est possible (i) d'élaborer un étiquetage discriminant qui fournirait aux acheteurs des informations permettant de diminuer significativement leurs expositions et (ii) pour les fabricants, de réduire les émissions des produits les plus émissifs.

Un étiquetage moins ambitieux, uniquement fondé sur des informations génériques, pourrait constituer une première étape. Par exemple, ce type d'étiquetage a été mis en place pour les désodorisants combustibles. En particulier, le décret n° 2017-946 [217] rend obligatoire un affichage d'information sur les emballages des produits désodorisants combustibles, comprenant des pictogrammes. Cet affichage met en avant deux messages de précaution (Figure 14) : (i) Ventiler la pièce après utilisation ; (ii) Éviter d'inhaler directement la fumée.



Figure 14 : Étiquetage d'information des désodorisants combustibles (décret n° 2017-946)

- Règlementer la mise sur le marché des produits les plus émissifs.
  Ce type d'action s'avérant généralement plus délicat à mettre en pratique - avec néanmoins un succès notable pour les produits de construction[18] [218] - le processus pourrait débuter par étudier la pertinence de réglementer la présence de certaines substances préoccupantes dans la composition des produits. Par exemple : substances préoccupantes parmi les ingrédients, ou ingrédients libérant des substances préoccupantes.

Accompagner les résultats de l'ERS de l'identification et de la description de mesures de gestion correspondantes, de façon objective et neutre, sans indiquer de choix ou de préférence entre ces mesures de gestion, me semble être un éclairage complémentaire utile pour le gestionnaire du risque, respectueux de la séparation de principe entre l'évaluation du risque et la gestion du risque [153].

En particulier, évaluer l'ampleur de la réduction des expositions pouvant être apportée par chaque mesure de gestion serait, de mon point de vue, un éclairage complémentaire particulièrement intéressant et cohérent avec les recommandations du Silver Book [154].

Gestion des données manquantes

Avoir pu s'appuyer sur des sondages nationaux décrivant les usages des consommateurs - pour les désodorisants combustibles et non combustibles - constitue un des principaux points forts de ces travaux, en particulier dans un contexte où les déclinaisons de la démarche ERS doivent

[18] En termes d'étiquetage. En parallèle, il aurait été utile de s'assurer que la performance de ces produits n'avait pas diminué suite à la mise en place de cet étiquetage.

souvent être faites, au mieux, avec des données partielles sur les usages. Avec le recul, il me semble que le contenu de ces sondages pourrait faire l'objet d'autres exploitations, à l'occasion de potentiels compléments d'études. Par exemple :

- Certains paramètres ayant une forte influence sur l'évaluation des expositions - qui seraient identifiés sur la base d'une étude de sensibilité préalable - pourraient être caractérisés par une distribution de probabilité, plutôt que par des valeurs réalistes ou raisonnablement majorantes. Cela permettrait de mieux tenir compte de la variabilité de ces paramètres, en s'appuyant sur de nombreuses valeurs plutôt que sur deux valeurs.

  Dans ce cas, l'ERS ne serait plus déterministe mais probabiliste, ce qui conduirait à des résultats plus précis, exprimés en probabilité que des indicateurs de risques dépassent les valeurs repères usuelles. En termes d'interprétation, le percentile 95 (P95) de la distribution obtenue peut être considéré comme point de référence dans ce contexte, comme le fait par exemple l'Anses : « *lorsque le P95 de la distribution des doses d'exposition est supérieur [à la valeur de toxicité retenue], les experts concluent qu' « il existe des situations présumées à risque » si les expositions sont modélisées ou qu'« il existe des situations à risque » si les expositions sont mesurées* » [219]. Il est possible de retenir un percentile plus protecteur (par exemple le percentile 99), notamment lorsque l'étude porte sur une grande population (par exemple dans le cas d'ERS réalisées à l'échelle nationale), car un faible pourcentage peut correspondre à des milliers de personnes.
- Des calculs de risques collectifs pourraient également être menés à bien, à l'image de ceux réalisés par l'Anses sur la base de concentrations de fond en certains polluants classiques dans l'air intérieur [72].

  Pour les effets sans seuil, les résultats de ces calculs seraient exprimés en nombre de cas supplémentaires d'apparition d'un effet ; pour les effets continus sur des paramètres biologiques variables dans le fonctionnement normal de l'organisme, on pourrait aussi penser à un nombre de personnes dont les variations induites dépasseraient une gamme de valeurs caractérisant le fonctionnement biologique normal (par exemple, une variation du niveau mesurable d'une hormone supérieure à 30 % par rapport à la valeur moyenne). Pour les effets à seuil, il est possible d'estimer le nombre de personnes exposées à un certain niveau de risque (par exemple : QD > 1). En particulier, il serait intéressant d'identifier les populations pour lesquelles des indicateurs de risque relativement élevés sont calculés. Cela peut contribuer à cibler et à proportionner de futures mesures de gestion des risques.

  Par ailleurs, des discussions que j'ai pu entendre entre acteurs économiques et ministères dans ma vie professionnelle, il me semble que le risque collectif (nombre de cas, avec potentiellement le coût associé [71, 79, 220]) a souvent une plus grande influence sur les décideurs que des évaluations de risque au niveau d'un individu type, ce qui n'est pas surprenant dans une logique de santé publique, lorsque ce type de données est accessible.

  Dans cette même logique, pour le cadre des démarches ERS visant à appuyer la gestion des émissions des ICPE, des systèmes d'information géographique (SIG) peuvent être utilisés pour réaliser des calculs géoréférencés de niveaux d'exposition et d'indicateurs de risque [221], représentables sur une carte (Figure 15). Si les données d'entrée de ces calculs sont issues des modélisations produites au cours de la démarche ERS (modélisation de dispersion atmosphérique suivie d'une modélisation multimédia, par

exemple), alors la question de la disponibilité d'un nombre suffisant de données spatialisées pour le SIG ne se pose pas. Cependant, si le calcul des expositions se base sur les données mesurées disponibles dans des milieux d'exposition, alors les incertitudes d'interpolation en présence ont besoin d'être évaluées, cartographiées et discutées.

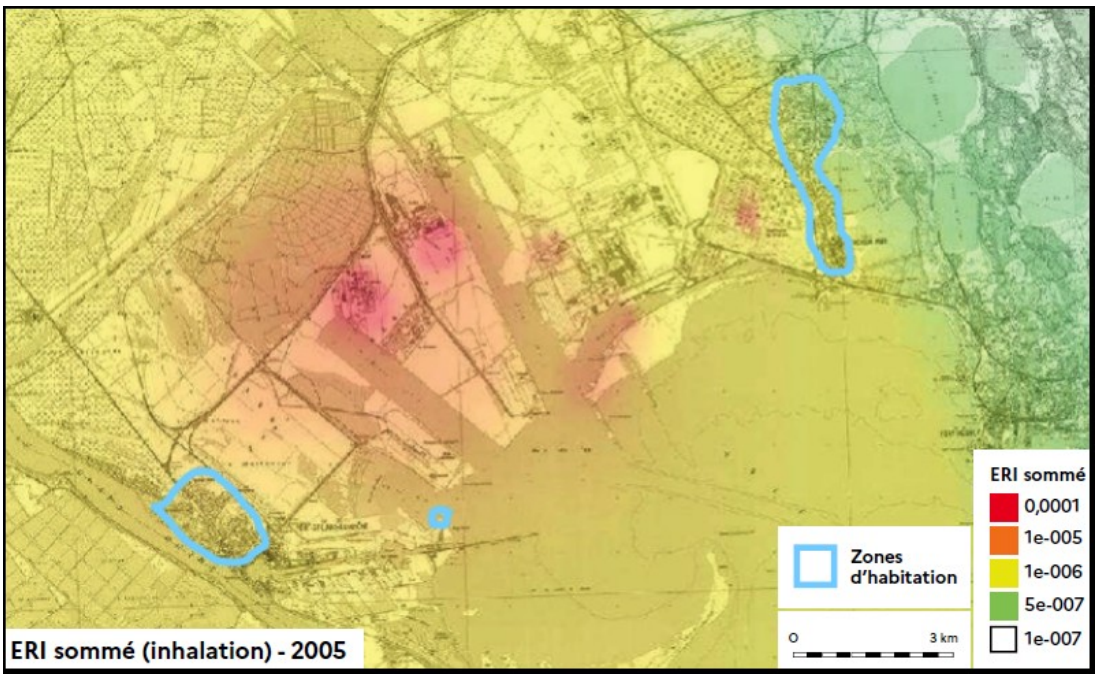


Figure 15 : Exemple de carte d'iso-risque [52]

Développement de compétences de chercheur

Ces travaux ont été l'occasion de développer ou de renforcer plusieurs compétences types associées aux diplômés du doctorat (Tableau 1). Par exemple :

- faire le point sur l'état et les limites des savoirs au sein d'un secteur d'activité déterminé (Bloc 1), notamment avec les revues approfondies de littérature scientifique faites pour initier les travaux et pour interpréter les résultats obtenus ;
- mettre en œuvre les méthodes et les outils de la recherche (Bloc 2), en lien avec les besoins de nouvelles connaissances identifiés avec les revues de littérature initiant mes projets ;
- mettre en œuvre l'ensemble des dispositifs de publication à l'échelle internationale permettant de valoriser les savoirs et connaissances nouvelles (Bloc 3), avec notamment deux publications dans des revues internationales [41, 42] et trois participations à des conférences internationales [37-39] ;
- développer des réseaux de coopération scientifiques et professionnels à l'échelle internationale (Bloc 4), notamment avec les travaux de normalisation au CEN/TC 421 et les scientifiques rencontrées dans des conférences (les échanges se sont poursuivis ensuite, amenant par exemple à intégrer les CLI dans mes travaux (section C.2)) ;
- enseigner et former des publics diversifiés à des concepts, outils et méthodes avancés (Bloc 5), avec l'intégration des résultats de nos travaux dans les formations délivrées

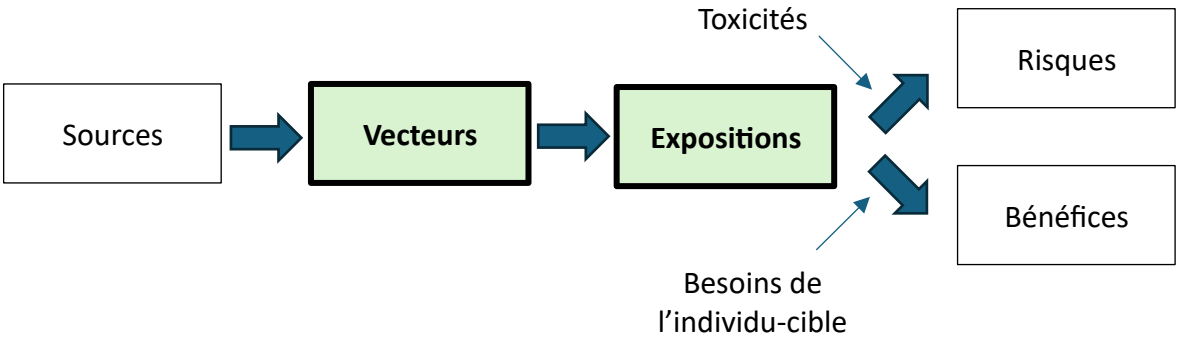
par l'Ineris, notamment la formation intitulée *Qualité de l'air intérieur : mieux connaître les expositions et les risques*. Cette formation s'adressait à des bureaux d'études, des collectivités locales et des représentants de services déconcentrés de l'État ;

- évaluer le travail des personnes et de l'équipe vis à vis des projets et objectifs (Bloc 6), ce qui faisait partie de mes missions de coordinateur de work packages (WP) incluant le travail de plusieurs ingénieurs-chercheurs (modélisateur, spécialiste de la mesure à l'émission ou dans l'air ambiant, analyste de laboratoire…) et techniciens ;
- animer et coordonner une équipe dans le cadre de tâches complexes ou interdisciplinaires (Bloc 6) : en complément de l'animation de WP, mes activités liées à la qualité de l'air intérieur m'ont amené à animer et à coordonner le programme d'appui technique « Environnements intérieurs » auprès du Bureau Santé Environnement du ministère chargé de l'Écologie (400 k€/an ; 2015-2020), incluant le travail d'environ 15 personnes ;
- repérer les compétences manquantes au sein d'une équipe et participer au recrutement ou à la sollicitation de prestataires (Bloc 6), notamment avec l'intégration d'une modélisatrice de la qualité de l'air intérieur dans l'équipe projet.

D. Gestion des émissions des ICPE : fiabiliser l'évaluation des expositions pour les populations riveraines

« *Combattre les risques à la source* »

Un des neuf principes généraux de prévention [222]



Emissions from industrial sites: how to improve exposure assessment for local residents? Feedback on a national level in France

Guillaume KARR[a], Roseline BONNARD[a,*]

[a]Ineris (French National Institute for Industrial Environment and Risks). Parc Technologique Alata, Verneuil-en-Halatte (60), France.

*Correspondence to: Roseline BONNARD, roseline.bonnard@ineris.fr

Abstract

To obtain an environmental operating permit for an industrial site, studies must be carried out to demonstrate to the local authorities that the projected environmental emissions will not cause health issues for neighboring populations. In France, for

Un résumé de ces travaux est proposé ci-après, suivie d'une discussion des perspectives envisagées à ce stade.

D.1. Résumé des travaux

Introduction

Pour démontrer la maîtrise des émissions dans l'environnement d'une installation classée pour la protection de l'environnement (ICPE), son exploitant réalise notamment une étude des potentiels effets sanitaires de ces émissions sur les populations riveraines (« étude sanitaire »). Ce type d'étude inclut une ERS, qui elle-même inclut une évaluation des expositions (section A.3). Dans ce cadre, l'Ineris et les services instructeurs de l'État (DREAL) ont relevé des pratiques inappropriées récurrentes dans les études qu'ils ont analysées, concernant notamment la manière dont est menée l'étape de l'évaluation des expositions. L'objectif des travaux présentés dans cette section est d'améliorer l'évaluation des expositions dans les études sanitaires des ICPE. En termes de modalités pratiques, ces travaux sont actuellement en cours de réalisation à l'Ineris - l'organisme public de référence sur les ERS des ICPE depuis plus de 20 ans - en collaboration avec Roseline Bonnard.

Méthode

Une collecte de retours d'expérience sur les pratiques inappropriées actuellement observées dans les études a été menée auprès de différentes sources : experts de l'Ineris ayant réalisé des tierces expertises d'études sanitaires d'ICPE, littérature scientifique et technique, référents Risques sanitaires au sein des DREAL, inspecteurs DREAL en formation continue avec l'Ineris, agents du ministère chargé de l'Écologie coordonnant l'action des DREAL.

Sur la base des retours d'expérience collectés, un GT composé d'experts de l'Ineris a identifié des pratiques inappropriées - c'est-à-dire ne répondant pas aux attendus de la démarche ERS, et de ce fait, pouvant fausser les conclusions obtenues - à la fois fréquemment rencontrées et pouvant avoir une forte influence sur les expositions quantifiées. Des propositions d'amélioration de ces pratiques ont été formulées en complément, également en s'appuyant sur les réflexions collectives issues du GT.

Résultats

Les résultats obtenus ont consisté en sept propositions d'amélioration de la manière dont les évaluations des expositions sont menées dans les études sanitaires des ICPE. Ces propositions se présentent comme suit :

(i) Clarifier l'objectif de l'évaluation et donc la logique des choix de données pour les paramètres de calcul.

Si l'évaluateur souhaite démontrer l'absence de risque préoccupant pour les riverains, il renseignera les paramètres de l'étude (par exemple : flux d'émissions des installations) avec des données qui majorent raisonnablement les expositions calculées. Mais si l'évaluateur souhaite plutôt orienter les campagnes de surveillance de l'ICPE étudiée, à l'émission et potentiellement dans l'environnement, il choisira les données les plus réalistes/probables possible.

(ii) Préciser et prendre en compte la manière dont les données utilisées ont été produites.

Par exemple, pour les facteurs de transfert sol-plantes, certains modèles multimédias utilisent des valeurs par défaut qui correspondent à des sols amendés par des boues de station d'épuration, ce qui est peu représentatif du transfert sol-plante de polluants issus de rejets d'ICPE dans l'air et dans l'eau.

(iii) Évaluer quantitativement les incertitudes associées au calcul des expositions.

Pour les principales contributions au risque total multi-substances (ex : ingestion de salades contaminées à l'arsenic ? Ou inhalation de benzène ? Ou ingestion d'œufs contaminés par des dioxines ? Etc.), une étude de sensibilité devrait être réalisée sur les paramètres ayant une grande influence sur les expositions calculées.

(iv) Prendre en compte les dépôts atmosphériques dans la sélection des sites d'intérêt de l'étude sanitaire.

Les modèles de dispersion des émissions atmosphériques des ICPE produisent des cartes de concentrations dans l'air et des cartes de dépôts atmosphériques, avec des panaches de dispersion pouvant être de formes significativement différentes (Figure 16). Le plus souvent, seules les cartes de concentrations dans l'air sont utilisées pour sélectionner des lieux où faire des calculs contribuant à l'évaluation des expositions (typiquement les lieux avec de fortes concentrations dans l'air et où peuvent se trouver des populations). Néanmoins, les cartes de dépôts atmosphériques permettent d'identifier des zones avec de potentielles contaminations significatives du sol et des végétaux, qui peuvent fortement contribuer au risque total multi-substances.

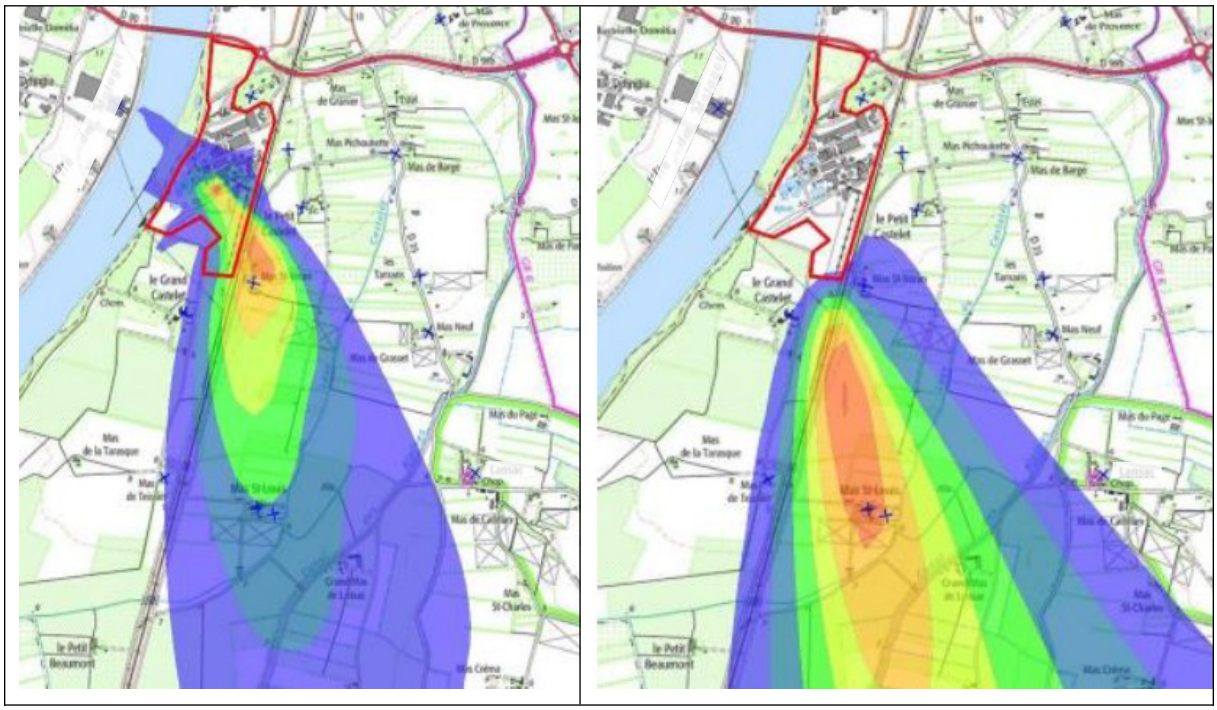


Figure 16 : Exemples de formes de panaches différentes pour les dépôts atmosphériques (à gauche) et les concentrations dans l'air (à droite) pour une même substance[19]

À partir du bilan des émissions d'un site industriel et de données météorologiques locales, une modélisation de dispersion atmosphérique est souvent réalisée dans le cadre des ERS pour les ICPE. Cette modélisation permet d'obtenir des cartes de dispersion pour chaque polluant.
Les retombées modélisées incluent des concentrations dans l'air et des dépôts atmosphériques [223], dont la répartition dans l'espace peut être différente, en fonction des caractéristiques des différentes émissions du site.

(v) Prendre en compte la potentielle contamination des plantes par les dépôts gazeux secs.

Classiquement, seuls les dépôts particulaires et les dépôts gazeux humides (lessivage par des précipitations) sont considérés dans les études. Or, pour certaines substances tels que des PCB légers, les dépôts gazeux secs (absorption foliaire - Figure 17) peuvent correspondre à la voie de contamination prépondérante.

[19] L'objectif de cette figure se limite à illustrer des formes de panache et de gradients de concentrations et de dépôts. Elle n'implique aucune interprétation des valeurs associées au code couleurs retenu.

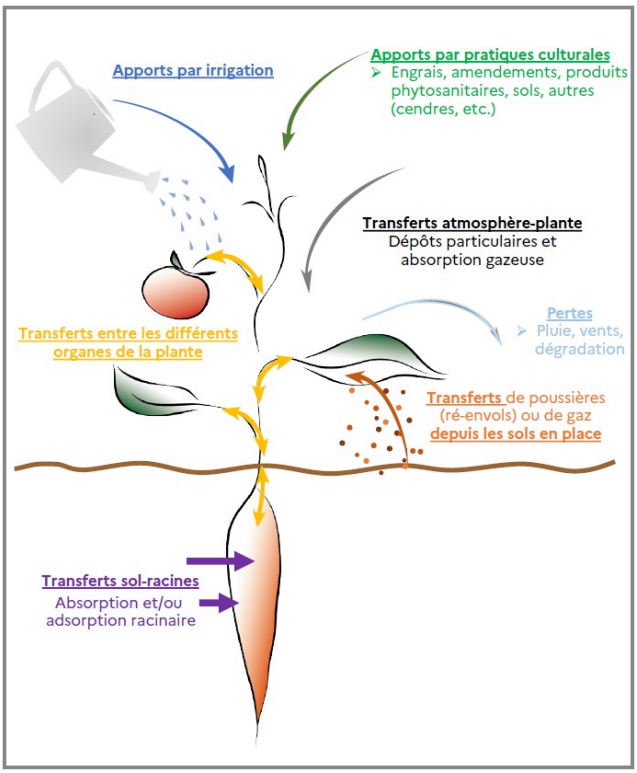


Figure 17 : Représentation simplifiée des mécanismes de transfert multimédia vers un végétal, incluant l'absorption gazeuse [52]

Cette figure illustre différentes voies de contamination d'un végétal qui peuvent être considérées dans une modélisation multimédia :

- apports par irrigation ;
- apports par des pratiques culturales ;
- transferts depuis l'atmosphère ;
- transferts depuis le sol (directement ou après ré-envol de particules de sol)

(vi) Calculer les risques pour les effets sans seuil sur la durée d'une vie entière, uniquement.

Il est classique de trouver dans les études sanitaires des « risques sans seuil » calculés sur certaines périodes de vie, telles que la période 0-6 ans. Or les calculs de risques sans seuil s'appuient sur des VTR qui portent sur la vie entière.

(vii) Prendre en compte les usages raisonnablement possibles autour du site de l'ICPE, et pas seulement les usages constatés au moment de l'étude. Typiquement, il est intéressant de consulter le plan local d'urbanisme (PLU) de la commune où se situe l'ICPE étudiée et de contacter les services de la mairie chargés de l'urbanisme et de l'aménagement, afin de connaître les évolutions envisagées pour les usages autour du site.

Discussion

Concernant cette analyse critique des pratiques existantes en ERS pour les ICPE, les enjeux associés sont importants, car les pratiques inappropriées recensées peuvent avoir une forte influence sur les risques quantifiés et peuvent donc conduire à des conclusions inexactes pour les études sanitaires.

En termes de gestion des expositions des populations riveraines d'ICPE, de potentielles conclusions inexactes présentent deux types de problématiques :

(i) les études sanitaires peuvent conclure à tort à l'absence de risque préoccupant. Par exemple, une de ces pratiques inappropriées pourrait conduire à sous-estimer les expositions et donc à sous-estimer les risques.

(ii) les principaux déterminants du risque sanitaire total (substances, lieux, voies d'exposition) peuvent ne pas être identifiés. Par exemple, une de ces pratiques inappropriées pourrait conduire à sous-estimer l'exposition par ingestion de salades contaminées par l'arsenic, et surestimer l'exposition par ingestion d'œufs contaminés par des dioxines ; dans ce contexte, les risques liés à l'arsenic pourraient être considérés comme négligeables par rapport aux risques liés aux dioxines, alors que l'arsenic est en réalité la substance présentant la plus forte contribution au risque total. Ce type de situation pourrait donc conduire à donner la priorité à des mesures de surveillance - à l'émission et dans l'environnement - et à des efforts de réduction des émissions bien moins efficaces pour réduire les risques des riverains. Par conséquent, les réglementations locales de gestion des risques élaborées par les DREAL pourraient s'avérer insuffisamment protectrices et empêcher une dynamique efficace de réduction de l'exposition des populations riveraines.

Ce type d'exercice de retour d'expérience à l'échelle nationale n'a pas été réalisé en France depuis environ 20 ans. De plus, ce type d'exercice n'a jamais été partagé au sein de la communauté scientifique avec une publication. Or les bonnes pratiques proposées ne sont pas spécifiques au contexte français : elles peuvent être tout aussi utiles pour les études sanitaires des émissions des industries d'autres pays.

Valorisation

Ces travaux ont été valorisés par la rédaction d'un article scientifique, à destination d'une revue internationale à comité de lecture, actuellement en cours de soumission. Le titre proposé est *Emissions from industrial sites: how to improve exposure assessment for local residents? Feedback on a national level in France*.

Le texte complet de cet article n'est pas fourni en complément du résumé ci-dessus, car le processus de soumission en cours inclut des engagements d'exclusivité. Néanmoins, le contenu détaillé de ces travaux a été présenté oralement lors de la soutenance de thèse, le 3 février 2026.

En complément, les auteurs visent à présenter ces travaux à la conférence internationale de l'International Society of Exposure Science (ISES), à l'automne 2026.

Les résultats ont également été intégrés dans les formations que l'Ineris délivre régulièrement auprès des inspecteurs des DDPP et des DREAL (« Police de l'environnement ») en formation de prise de poste et en formation continue [224], et aussi de manière plus ponctuelle, auprès d'étudiants du CNAM.

D.2. Compétences développées et perspectives

La finalisation de ces travaux étant en cours, et puisqu'ils ont déjà comme objet de fournir une analyse réflexive sur les pratiques de la démarche ERS dans le cadre de la gestion des ICPE, cette section portera sur les perspectives envisagées, en complément de l'analyse du développement de compétences de chercheur.

Développement de compétences de chercheur

Ces travaux ont été l'occasion de développer ou de renforcer plusieurs compétences types associées aux diplômés du doctorat (Tableau 1). Par exemple :

- disposer d'une expertise scientifique tant générale que spécifique d'un domaine de recherche et de travail déterminé (Bloc 1).
  Cette expertise scientifique s'est développée avec des études répondant à la logique du trépied de l'Ineris (Partie 1) : des prestations de services pour des clients industriels, les études étant parfois prescrites par la DREAL ; des travaux d'appui méthodologiques auprès du ministère chargé de l'Écologie (DGPR/BAPP) ; des travaux de recherche appliquée, comme par exemple avec l'article présenté dans la présente section.
  Cette expertise s'est renforcée (i) au fur et à mesure de collaborations avec des experts expérimentés de l'Ineris, pendant la réalisation normale des études ou avec des démarches spécifiques de mentorat, et (ii) avec de la formation continue centrée sur des thématiques en lien direct avec les ERS. Par exemple : utilisation de l'ERS dans la gestion des SSP (2025) ; mesure des émissions de polluants à l'atmosphère (2024) ; logiciel ADMS-6 pour la modélisation de la dispersion de rejets atmosphériques de polluants à l'état gazeux ou particulaire (2023) ; logiciel MODUL'ERS (2017) (utilisateur avancé : 2022) pour la modélisation des transferts de substances dans les milieux environnementaux. Par exemple : eaux, air, sol, végétaux, produits animaux, etc. ; rôle de l'Autorité environnementale (2017) ; toxicologie appliquée dans l'évaluation des risques sanitaires (2016) ; étude d'impact (2016).
  Ces formations variées peuvent être aussi mises en regard du contenu du Bloc 4 : « *Disposer de la curiosité, de l'adaptabilité et de l'ouverture nécessaire pour se former et entretenir une culture générale* » ;
- respecter les principes de déontologie et d'éthique en relation avec l'intégrité des travaux et les impacts potentiels (Bloc 3).
  En effet, ces travaux ont impliqué des personnes qui, après vérification, ne présentaient aucun lien d'intérêt en rapport avec les sujets traités, en particulier aucun lien d'intérêt problématique avec des industriels gérant des ICPE à enjeux ;
- disposer d'une compréhension, d'un recul et d'un regard critique sur l'ensemble des informations de pointe disponibles (Bloc 4) avec, notamment, les présents travaux de retours d'expériences et d'analyse critique.
  J'ai également pu faire partie du GT qui a élaboré la dernière version du guide ICPE [52] ;
- enseigner et former des publics diversifiés à des concepts, outils et méthodes avancés (Bloc 5), avec trois principales formations délivrées :
  - Prévention et gestion des risques sanitaires chroniques. Formation continue des inspecteurs DREAL et DDPP, ainsi que des bureaux d'études spécialisés dans le volet sanitaire des études d'impact des ICPE. Centre de Formation du Développement

durable et de l'Environnement (CFDE), pour le ministère chargé de l'Écologie. Depuis 2014.
    - Risques sanitaires chroniques. Formation « Semaine Technique » pour les inspecteurs DREAL et DDPP en prise de poste. CFDE, pour le ministère chargé de l'Écologie. Depuis 2012.
    - Formation auprès d'étudiants, plus ponctuellement. Par exemple : CNAM - Formation Hygiène, sécurité et environnement (HSE).
- s'adapter à un public varié pour communiquer et promouvoir des concepts (Bloc 5), les formations délivrées s'adressant à des bureaux d'études, à des inspecteurs de l'État, à des agents de collectivités territoriales, à des militaires, à des étudiants. Le développement de ces compétences spécifiques a été renforcé avec une formation de formateur certifiante, composée de trois étapes : méthode générale (2015), conception des supports (2017), positionnement par rapport aux participants (2020) ;
- animer et coordonner une équipe dans le cadre de tâches complexes ou interdisciplinaires (Bloc 6).
  Sur ce thème de la maîtrise des émissions des sites industriels, le pilotage de plusieurs projets m'a également permis de développer des compétences de coordination d'équipes, composées de personnes spécialistes de différentes disciplines. Par exemple : toxicologues, modélisateurs, préleveurs, analystes de laboratoire, spécialistes des équipements ou des procédés étudiés et des meilleures techniques disponibles (MTD) associées.
  En fonction du périmètre de l'étude souhaité par certains industriels et par certaines DREAL, des prestataires ont pu être recherchés, sollicités puis sélectionnés, pour compléter les compétences disponibles à l'Ineris. Par exemple : avec des spécialistes de la mesure de bruit. Ceci fait écho à un autre contenu du Bloc 6 : « *Repérer les compétences manquantes au sein d'une équipe et participer au recrutement ou à la sollicitation de prestataires* » ;
- évaluer le travail des personnes et de l'équipe vis à vis des projets et objectifs (Bloc 6), avec mon rôle de chef de projet pour de nombreuses études.

Perspectives

Mise à jour du guide ICPE

Les axes d'amélioration identifiés avec ces travaux feront partie des propositions de l'Ineris pour la prochaine mise à jour de la méthode de référence en France. En effet, depuis sa première version de 2003 [151], le guide ICPE a fait l'objet d'une refonte en 2013 [225], puis d'une mise à jour en 2021 [52]. Une nouvelle mise à jour est envisagée pour 2027 ou 2028 : elle s'appuiera notamment sur les propositions d'un GT où figurera des experts de l'Ineris, qui pourront relayer les présentes propositions d'amélioration.

Les lignes directrices étant ainsi modifiées et affinées dans la méthode de référence, il est attendu que le nombre de mauvaises pratiques recensées dans ce type de travaux baisse significativement.

De plus, un parangonnage (« benchmarking ») sur les études demandées pour obtenir un permis d'exploiter une installation industrielle, à l'échelle internationale, pourrait être réalisé en 2026 à l'Ineris, avec deux objectifs : (i) situer le niveau d'exigence en France par rapport à

d'autres pays raisonnablement similaires ; (ii) identifier des bonnes pratiques appliquées dans d'autres pays et applicables en France, afin de poursuivre l'affinage et l'amélioration des lignes directrices actuelles.

Plus généralement, cette mise à jour s'inscrira dans une dynamique d'amélioration continue et de réduction des expositions préoccupantes pour les riverains d'ICPE. Cette dynamique s'appuie notamment sur la directive européenne portant sur les émissions industrielles (« Directive IED ») [226]. Cette directive impulse une réduction progressive des émissions des ICPE, en s'appuyant notamment sur les notions de :

- meilleures techniques disponibles (MTD), qui sont décrites dans des documents techniques de référence (BREF) par grand secteur industriel [227]. Ces documents sont régulièrement révisés pour tenir compte de l'évolution des techniques et des pratiques au sein des branches professionnelles. Dans ces BREF, la section « Conclusions sur les MTD » [228] a une portée réglementaire - elle fait l'objet d'une décision d'exécution publiée au Journal officiel de l'Union européenne [226, 229] - et indique les niveaux d'émission associés aux meilleures techniques disponibles (NEA-MTD ; en anglais : *Best Available Techniques Associated Emission Level* - BATAEL) applicables ;
- dossier de réexamen (anciennement « bilan de fonctionnement »). Ce dernier est à réaliser dans un délai d'un an à compter de la publication des Conclusions sur les MTD correspondant à l'activité principale de l'ICPE considérée. Les conditions d'autorisation, dont les VLE, devront être réexaminées et, si besoin, actualisées sur la base du contenu de ce dossier.

Ceci fait écho à l'objectif national de « *réduire de manière substantielle les émissions d'origine industrielle des substances toxiques pour la santé* », inscrite dès le premier PNSE [53]. Par exemple : « *Diminuer à horizon 2010 les émissions industrielles dans l'air de 85% pour les dioxines, 50% pour le cadmium, 65% pour le plomb, 40% pour le chlorure de vinyle monomère et de 35% pour le benzène* » [53].

« C*e programme de réductions des émissions est mis en œuvre au travers de la législation relative aux installations classées. La mise en œuvre de ce programme sera déclinée au niveau de chacune des installations visées par cette action* » [53], sachant que les ICPE les plus émettrices « *doivent respecter les prescriptions de leur arrêté préfectoral d'autorisation pour assurer la sécurité des personnes et la protection de l'environnement* » [53], ce type d'arrêté fixant des VLE notamment fondées sur les résultats de l'étude sanitaire des ICPE.

Article de retour d'expérience sur l'IEM

En France, depuis 2013 [162], les études des potentiels effets sanitaires des ICPE s'appuient sur deux outils : en amont et en complément d'une ERS, l'évaluateur doit réaliser une « interprétation de l'état des milieux » (IEM).

L'IEM s'articule autour de trois tâches successives :

- réaliser des mesures dans les milieux d'exposition se trouvant sous l'influence des émissions de l'ICPE étudiée, en cohérence avec le schéma conceptuel spécifique à la situation en présence ;

- évaluer le niveau de dégradation de ces milieux, en comparant les concentrations mesurées avec celles caractérisant un environnement local non dégradé (« l'environnement du site, sans l'influence du site », « le bruit de fond local », « les valeurs de fond locales »).
  Idéalement, ce dernier est caractérisé par des mesures dans des environnements similaires mais se trouvant en dehors de l'influence de l'ICPE : on parle d'« environnement local témoin » (ELT).
  À défaut d'ELT, l'évaluateur peut s'appuyer sur l'état initial réalisé avant le début de l'exploitation de l'ICPE étudiée, lorsqu'il existe et si pertinent, ainsi que sur des données issues de référentiels locaux ou nationaux établis par des organismes publics de références ; par exemple : agences de l'eau, associations agréées de surveillance de la qualité de l'air (AASQA - Fédération Atmo France), Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM), Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (INRAE), ministère chargé de la Santé ;
- pour les milieux dégradés, évaluer leur compatibilité avec les usages recensés dans le schéma conceptuel de l'étude, en comparant les concentrations mesurées sous l'influence du site avec les valeurs de gestion réglementaires (VGR) relatives à la qualité des milieux environnementaux [230, 231].
  Les VGR sont « *les valeurs de gestion définies pour la protection de la santé humaine par la réglementation[. Elles] correspondent* in fine *au niveau de risque accepté par les pouvoirs publics pour l'ensemble de la population* » [52].
  À défaut de VGR pour une substance étudiée, le guide ICPE indique que la compatibilité peut être évaluée en utilisant des valeurs de gestion produites « *par des organismes d'expertise reconnus* », tels que l'OMS ou le HCSP.
  À défaut de valeur de gestion - réglementaire ou non - correspondant à une substance, un milieu et un usage étudiés, la compatibilité est évaluée « *à la suite d'une quantification partielle des risques* » [52] ; cette quantification est réalisée avec :
  - des indicateurs de risques, dont la logique s'inspire des QD et des ERI de l'ERS ;
  - les concentrations mesurées dans les milieux d'exposition se trouvant sous l'influence des émissions de l'ICPE étudiée ;
  - en considérant successivement chaque substance, chaque milieu et chaque usage retenus dans l'étude, en cohérence avec le schéma conceptuel.

  Des grilles de calcul préformatées, mises à disposition sur Internet par le ministère de l'Écologie [232], constituent « *le support recommandé pour réaliser ce calcul* » [52].

De la même manière que pour les ERS des ICPE, les experts de l'Ineris sont amenés à réaliser ou à tierce expertiser régulièrement des IEM, ainsi qu'à répondre à de nombreuses questions portant sur la méthode de l'IEM et sur ses applications spécifiques. Pour ce deuxième outil de la démarche intégrée également, des mauvaises pratiques récurrentes sont observées. Ce constat pourrait donner lieu à un autre travail structuré de prise de recul critique, de retour d'expérience à l'échelle nationale et de proposition d'améliorations, toujours dans la logique de viser une meilleure maîtrise des émissions des ICPE.

Aide au choix de paramètres sensibles : action à poursuivre

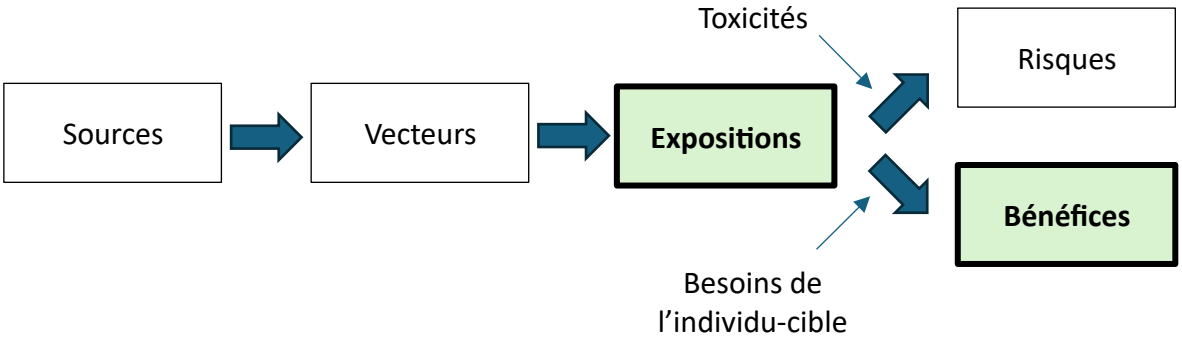
Les travaux réalisés ont souligné le besoin de retenir des données adaptées aux spécificités de la situation étudiée. Si cette conclusion peut s'apparenter à une forme de bon sens, elle suppose un travail de collecte des données existantes et d'approfondissement de leur mode de production qui peut s'avérer fastidieux et chronophage, notamment au regard du besoin de réactivité des entreprises. Par conséquent, dans la pratique, on observe que les sources de données les plus souvent utilisées sont celles qui se caractérisent par la plus grande facilité et la plus grande rapidité d'accès. C'est l'une des raisons pour lesquelles les bases de données associées aux modèles de référence sont si fréquemment utilisées. Cependant, comme mis en avant dans les travaux réalisés, la plupart du temps, il s'agit de valeurs uniques, fournies sans aucune indication sur la façon dont elles ont été produites et sur ce qu'elles représentent (valeur moyenne ? Valeur majorante ? Autre ?), quelles que soient leur sensibilité (influence sur les quantifications de risques réalisées), leur variabilité ou leurs incertitudes. Au regard de ces enjeux, une manière d'élever la qualité des ERS consisterait à expliciter des lignes directrices de collecte et de choix de valeurs de paramètres, en particulier pour les paramètres les plus sensibles. En complément, une autre manière consisterait à réaliser un travail préalable de collecte et de description des valeurs existantes, pour certains paramètres connus pour leur fréquente sensibilité sur les résultats des ERS dans le cadre de la gestion des ICPE. C'est le cas notamment des facteurs de bioconcentration (BCF, de l'anglais *Bioconcentration Factor*), qui présentent souvent une variabilité de plusieurs ordres de grandeur. Pour plusieurs substances classiquement émises par des ICPE (ex : métaux) et pour plusieurs milieux environnementaux, de nombreuses mesures ont été effectuées, dans des conditions diverses. Ces données peuvent être utilisées pour estimer le devenir des substances dans l'environnement et l'exposition des populations, mais la nature et la qualité des données existantes et des sources de données varient considérablement. Par conséquent, l'utilisation de ces données nécessite un prétraitement minutieux, si l'on veut que l'évaluation de l'exposition gagne en qualité.

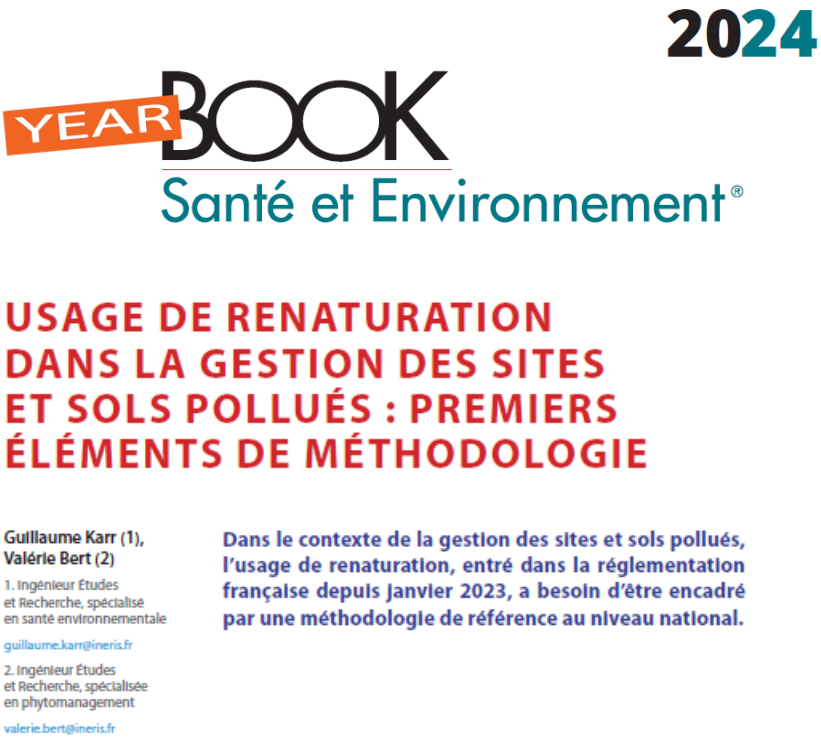
Ce travail de prétraitement est essentiel pour (i) comprendre le sens des niveaux d'exposition et de risque estimés - les valeurs retenues pour les BCF correspondent-elles aux valeurs les plus probables ? Aux valeurs les plus conservatrices ? Etc. - (ii) analyser et quantifier les incertitudes paramétriques et (iii) améliorer le niveau de transparence des études et donc la confiance dans les résultats obtenus. Dans ce contexte, l'amélioration de l'évaluation de l'exposition pourrait donc passer par un travail préalable approfondi réalisé par des organismes publics d'expertise, en appui des bureaux d'études réalisant des ERS pour les ICPE. Ce travail préalable viserait à (i) collecter les valeurs de BCF existantes et les informations disponibles sur la manière dont ces valeurs ont été produites, (ii) mettre les ensembles collectés à la disposition des évaluateurs et (iii) guider les évaluateurs dans le travail de sélection qu'ils doivent effectuer. C'est l'option choisie en France, avec l'ajout de rapports de synthèse bibliographique [233] à l'élaboration d'un modèle multimédia de référence, Modul'ERS [234-236]. À ce stade, cette approche a été mise en œuvre pour plusieurs substances et types de BCF : beaucoup de travail reste à réaliser en complément.

E. Gestion des sols pollués : encadrer l'usage de renaturation en maîtrisant les risques sanitaires

« *Nous voulons un avenir où nous pourrons vivre dans un environnement sain en entretenant des liens solides avec la nature.* »

Irina Bokova, alors directrice générale de l'UNESCO [237]





2024

YEAR BOOK

Santé et Environnement®

USAGE DE RENATURATION DANS LA GESTION DES SITES ET SOLS POLLUÉS : PREMIERS ÉLÉMENTS DE MÉTHODOLOGIE

Guillaume Karr (1), Valérie Bert (2)

1. Ingénieur Études et Recherche, spécialisé en santé environnementale

guillaume.karr@ineris.fr

2. Ingénieur Études et Recherche, spécialisée en phytomanagement

valerie.bert@ineris.fr

Dans le contexte de la gestion des sites et sols pollués, l'usage de renaturation, entré dans la réglementation française depuis janvier 2023, a besoin d'être encadré par une méthodologie de référence au niveau national.



(ID Modèle = 454913)

Ineris - 213291 - 2772344 - v3.0

03/07/2025

Méthodologie pour encadrer l'usage de renaturation dans la gestion des sites et sols pollués : premier rapport d'étape

INERIS
maîtriser le risque pour un développement durable

Nom de la Direction en charge du rapport : DIRECTION SITES ET TERRITOIRES

Rédaction : KARR Guillaume - BERT VALERIE

Vérification : LETHIELLEUX LAURENCE; CHARMOILLE ARNAUD

Approbation : Document approuvé le 24/01/2025 par DUPLANTIER STEPHANE

Liste des personnes ayant participé à l'étude : Nathalie Velly

L'Ineris remercie toutes les personnes interviewées pour avoir pris le temps de l'échange et pour avoir partagé leurs avis et retours d'expériences.

Un résumé de ces travaux est proposé ci-après, suivi d'une discussion des perspectives envisagées à ce stade.

E.1. Résumé des travaux

Introduction

Dans le cadre général des politiques publiques associées à la transition écologique (portant notamment sur le changement climatique, la perte de biodiversité et l'artificialisation des milieux environnementaux), l'usage de renaturation est devenu une option qui attire de plus en plus de gestionnaires de sites et sols pollués (SSP), car il présente de nombreux avantages. Par exemple : des coûts qui peuvent être fortement réduits (ex : pas d'excavation du sol pour un traitement hors site) ; des services écosystémiques qui peuvent contribuer à répondre à des problématiques locales (ex : gestion des crues) ou mondiales (ex : changement climatique) ; des possibilités de subventions publiques. De plus, de nombreuses études concluent à des effets positifs pour la santé associés à un contact avec la nature [238-240]. On retrouve ici un principe fondamental en santé environnementale : l'environnement n'est pas qu'une potentielle source de dangers, c'est aussi une potentielle source de bénéfices pour la santé, d'où ma proposition de compléter le continuum SVC par une case « bénéfices » dans le contexte de la santé environnementale (Figure 9).

L'usage de renaturation pour les SSP a besoin d'être encadré par une méthode de référence, qui permette notamment de répondre aux questions suivantes : comment définir l'objectif d'un projet de renaturation ? Comment sélectionner des indicateurs de suivi du processus de renaturation ? À partir de quand peut-on estimer qu'un usage de renaturation est réussi ? En réponse à ce besoin, l'objectif de ces travaux était d'élaborer une première proposition de méthode nationale de référence, afin d'encadrer le développement de l'usage de renaturation dans la gestion des SSP. En matière de modalités pratiques, ces travaux sont actuellement en cours à l'Ineris, en collaboration avec Valérie Bert et Laurence Lethielleux.

Méthode

Pour élaborer cette première proposition de méthode, une synthèse de la littérature scientifique et technique a été effectuée, portant notamment sur (i) les méthodes de renaturation existantes et sur (ii) les retours d'expérience de projets concrets en lien avec la renaturation de sols pollués. En parallèle, 14 chefs de projets français ont été auditionnés ; ils étaient issus de différents types de structures : bureaux d'études spécialisés en SSP, en paysage, en urbanisme, etc. Le contenu des échanges a été analysé selon la logique de la méthode SWOT [241], qui utilise une grille de lecture structurée en forces, faiblesses, opportunités et problèmes à résoudre, tels que perçus par les personnes auditionnées.

Résultats

Sur la base du contenu de la littérature et des retours d'expérience collectés, la méthode proposée s'articule autour de trois étapes principales :

1. choisir le milieu écologique type (MET) visé, selon une liste de référence telle que la typologie EUNIS (*European Nature Information System*) [242], correspondant à un gain écologique pour le site considéré, en cohérence avec son contexte pédo-bioclimatique,

et en tenant compte des besoins des différentes parties prenantes impliquées. Par exemple : gestionnaire du site, riverains ou élus locaux ;

2. sélectionner des indicateurs de suivi, au regard des principales caractéristiques d'intérêt du MET visé et de manière proportionnée aux enjeux ;
3. identifier un environnement local de référence (ELR), c'est-à-dire une déclinaison locale du MET visé, puis y mesurer les indicateurs de suivi sélectionnés : les résultats obtenus constituent alors l'objectif de la renaturation.

L'usage de renaturation est considéré comme réussi lorsque le site atteint un état résilient[20] et se trouvant sur une trajectoire menant à l'ELR (Figure 18).

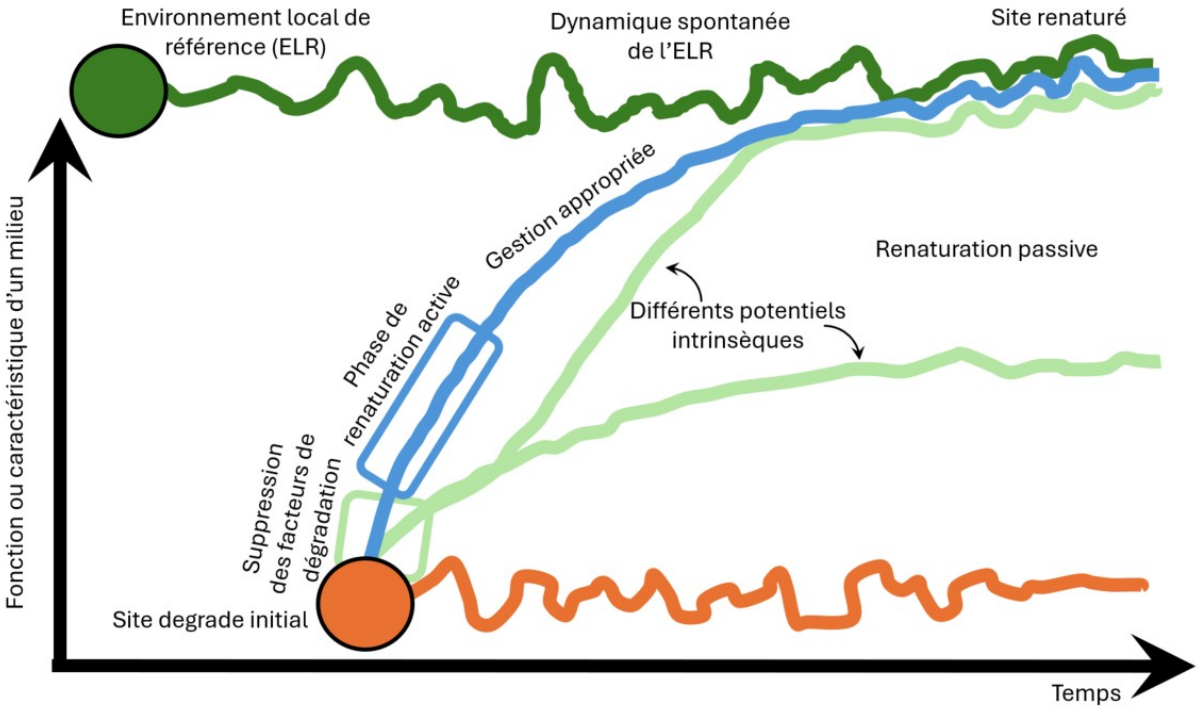


Figure 18 : Illustration de l'articulation entre renaturations active et passive (modifié à partir de Jaunatre et al. 2012 [243] et Gallet 2024 [244])

Par exemple, cette caractéristique (axe des ordonnées) pourrait être l'abondance en une espèce d'intérêt ; les fluctuations des courbes peuvent correspondre à des variations saisonnières, à des aléas climatiques, à l'influence d'activités à proximité du site, etc.
Pour certains sols, il suffira de supprimer certains facteurs de dégradation (ex : sources de pollution, dalles béton) pour que des processus naturels développent des écosystèmes s'approchant progressivement de ceux de l'ELR. On parle de renaturation « passive ».
Pour les autres sols, des interventions humaines seront nécessaires et pourront faire appel au génie écologique (ex : introduire des espèces ingénieures des écosystèmes de l'ELR) et au génie civil (ex : décompactage). On parle de renaturation « active ».

En complément, dans le cas particulier où des écosystèmes d'intérêt seraient initialement présents sur le site, l'usage de renaturation peut se limiter à des actions de conservation et de

[20] C'est-à-dire capable, après avoir été perturbé par une variation significative de ses conditions environnementales classiques (ex : un épisode de forte sécheresse), de revenir assez rapidement à son état normal.

suivi. Dans tous les cas, lorsque l'accès au site est autorisé pour la population générale, les risques associés à de potentielles pollutions résiduelles doivent être maîtrisés. Dans ce contexte, différents schémas conceptuels d'ERS ont été élaborés (Figure 19) au regard des spécificités des options possibles pour l'usage de renaturation. En particulier ces schémas conceptuels illustrent que :

- l'usage de renaturation peut être considéré indépendamment ou concomitamment avec d'autres usages réglementaires sur un même site. Par exemple : usage récréatif de plein air, usage résidentiel, usage d'accueil de populations sensibles, usage agricole. En particulier, la nature considérée peut être de la nature ordinaire ;
- des chemins balisés isolant du sol peuvent permettre d'éviter les expositions par ingestion de sol (par exemple : suite à des contacts mains-bouche).

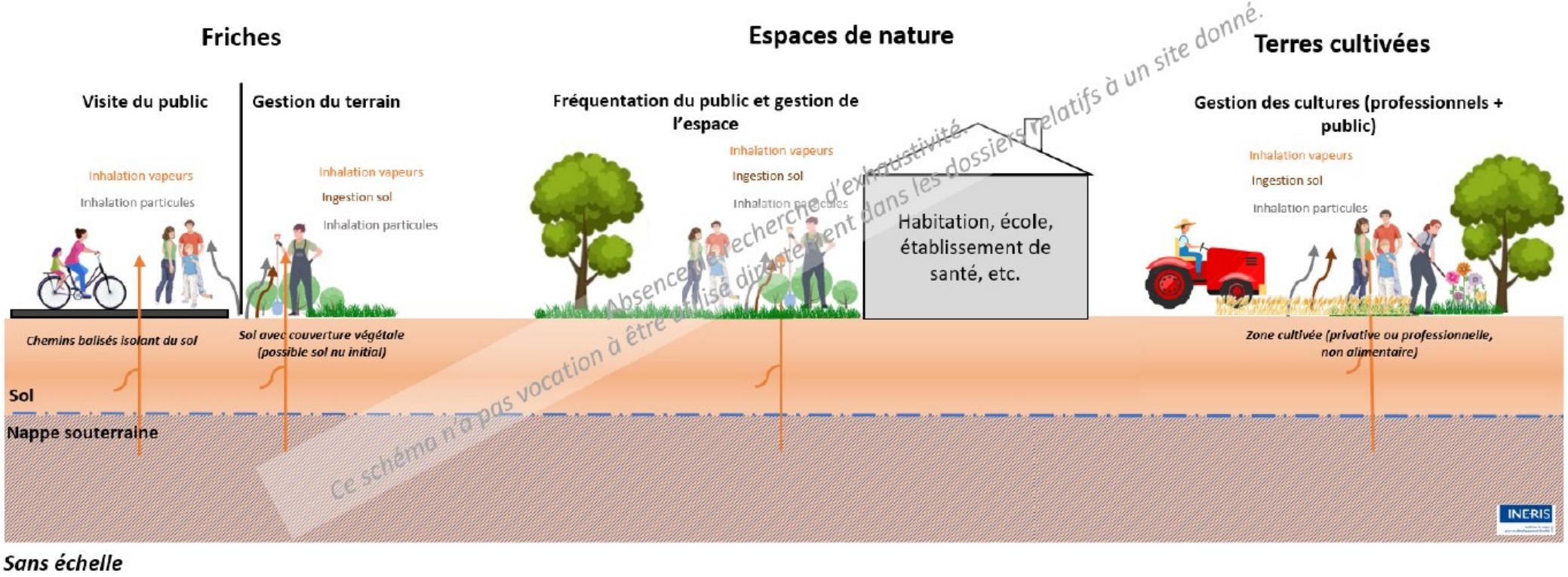


Figure 19 : Exemples d'illustrations de schémas conceptuels pour l'usage de renaturation dans la gestion des sites et sols pollués [56]

Les expositions humaines associées à l'usage de renaturation et à considérer dans une ERS sont présentées dans le Tableau 5.

Tableau 5 : Usage de renaturation : potentielles expositions humaines associées [56]

Éléments constitutifs de projets d'aménagement		**Usages des milieux**	**Populations exposées**	**Voies d'exposition à considérer dans l'ERS**
Friches (ex : terrains inutilisés)	Accès interdit au public (ex : réserve naturelle intégrale ; libre évolution jusqu'à la forêt)	Activités de gestion occasionnelles	Travailleurs gestionnaires du site	Inhalation de vapeurs et de particules de sol en suspension (ré-envol)
	Chemins balisés faits de matériaux non pollués et visant à éviter le contact avec le sol[21] (ex : espace naturel sensible)	Activités d'entretien et de gestion régulières	Travailleurs gestionnaires du site	Ingestion non intentionnelle de sol (contact mains-bouche)
		Visite pédagogique, promenade ; occasionnelle ou régulière	Adultes et enfants visiteurs - population générale	Inhalation de vapeurs et de particules de sol en suspension (ré-envol)
Espaces de nature (de nature ordinaire à nature à forts enjeux écologiques)		Usage récréatif de plein air, occasionnel ou régulier. Ex : parcs, aires de jeu.	Adultes et enfants - population générale	Inhalation de vapeurs et de particules de sol en suspension (ré-envol) Ingestion non intentionnelle de sol (contact mains-bouche)
		Usage résidentiel, incluant un jardin d'agrément (non potager)		
		Usage d'accueil de populations sensibles. Ex : aires de jeu et espaces verts intégrés dans des établissements		
Terres cultivées (ex : agriculture à visée non alimentaire : productions horticoles, énergétiques…)		Usage agricole (non alimentaire) avec gestion écologique du terrain, non destructrice des écosystèmes	Travailleurs agricoles, usagers de jardins privés (adultes et enfants)	Inhalation de vapeurs et de particules de sol en suspension (ré-envol) Ingestion non intentionnelle de sol (contact mains-bouche)

Les types d'aménagement pouvant correspondre à un usage de renaturation sont *a priori* des aménagements de pleine terre qui se réalisent sur des espaces naturels existants, ou en devenir sur des espaces artificialisés (avec une intention écologique).

Discussion

Cette méthode constitue une approche générale qui peut s'adapter à tous types de sites, de contextes et d'objectifs spécifiques, permettant de mettre en cohérence les projets de renaturation et de les inscrire dans la logique de la méthodologie nationale de gestion des SSP. Elle se fonde sur une intention écologique. Ici, l'objectif premier n'est pas de développer des services écosystémiques particuliers : l'objectif premier est de revenir à un milieu écologique résilient, qui apportera par surcroît des services écosystémiques [245].

[21] Par exemple, ce chemin peut être « revêtu » ou « recouvert », le guide Ineris sur les usages de 2023 définissant ces deux termes ainsi : « *Un sol est réputé revêtu si sa structure de surface est réalisée à l'aide d'asphalte, d'enrobés bitumeux, d'enduits superficiels d'usure, de béton, de ciment ou de pavés jointoyés par un matériau lié.* » et « *Un sol est réputé recouvert s'il est recouvert par au moins 30 cm de matériaux naturels ou équivalents, supposés être sains.* »

Plus généralement, les projets de renaturation dans la gestion des SSP peuvent être l'occasion de mettre en synergie des réponses à différents enjeux majeurs : (i) la protection et la valorisation de la nature ; (ii) l'atténuation des changements liés au climat et l'adaptation à ceux-ci ; et (iii) la réduction de l'exposition à des pollutions environnementales. Cette logique de synergie s'inscrit également dans l'approche « Une seule santé », qui replace l'humain dans un contexte écologique, soulignant les liens étroits entre santé humaine et santé des écosystèmes.

Valorisation

Ces travaux ont été valorisés avec la rédaction d'un article dans le YearBook Santé et Environnement 2024 [246]. De plus, le manuscrit d'une publication scientifique est en cours de rédaction à l'Ineris ; cette publication est à destination d'une revue internationale à comité de lecture, et le titre envisagé à ce stade est *Management of polluted soils: method for implementing a renaturation process*. Enfin, ces travaux ont fait l'objet d'une présentation orale à la conférence internationale sur la restauration écologique, organisée par la Society for Ecological Restoration (SER) en octobre 2025 [57].

E.2. Compétences développées et perspectives

Ces travaux étant en cours, cette section portera sur les perspectives envisagées, en complément de l'analyse du développement de compétences de chercheur.

Développement de compétences de chercheur

Ces travaux ont été l'occasion de développer ou de renforcer plusieurs compétences types associées aux diplômés du doctorat (Tableau 1). Par exemple :

- faire le point sur l'état et les limites des savoirs au sein d'un secteur d'activité déterminé (Bloc 1), en s'appuyant notamment sur l'audition de personnes ayant une expertise et une expérience importantes dans les domaines étudiés ;
- identifier et résoudre des problèmes complexes et nouveaux impliquant une pluralité de domaines (Bloc 1), notamment en appliquant la démarche ERS au sein d'un nouveau contexte : celui de la gestion écologique des SSP ;
- identifier les possibilités de ruptures conceptuelles et concevoir des axes d'innovation pour un secteur professionnel (Bloc 1), notamment avec le questionnement de la suppression systématique des pollutions de sol concentrées (cf. discussion des perspectives ci-dessous).
- acquérir, synthétiser et analyser des données et informations scientifiques (Bloc 4), avec la réalisation d'une revue approfondie de littérature scientifique ;
- disposer de la curiosité, de l'adaptabilité et de l'ouverture nécessaire pour se former et entretenir une culture générale (Bloc 4), avec la découverte et l'acculturation à des domaines relativement nouveaux pour moi comme, par exemple, le phytomanagement de pollutions de sols, l'écotoxicologie, l'évaluation des risques pour les écosystèmes, la microbiologie du sol ou l'ingénierie écologique.

- rendre compte et communiquer en plusieurs langues des travaux à caractère scientifique et technologique […] à l'écrit comme à l'oral (Bloc 5), avec une publication écrite dans le YearBook Santé et Environnement, en français, et une présentation orale à la conférence internationale SER 2025, en anglais.

Perspectives

Avis extérieurs sur cette première proposition de méthode

Les travaux réalisés et la proposition formalisée constituent la première étape du processus d'établissement d'une méthode nationale de référence. Du point de vue scientifique et technique, les prochaines étapes incluent la présentation de cette proposition à différents scientifiques et acteurs du domaine des SPP et de la restauration écologique, afin de recueillir des avis argumentés et d'obtenir une première prise de recul critique. Dans cet objectif :

- les travaux ont été présentés (pendant la période de rédaction de cette thèse) à la SER 2025, la conférence internationale de référence dans le domaine de la restauration écologique, afin d'échanger avec les scientifiques du domaine ;
- des interviews de spécialistes de la présence de biodiversité en ville (ex : ARB IdF, Plante & Cité, etc.) seraient des compléments intéressants aux interviews réalisés auprès de chefs de projet dans des contextes de SSP.
  Compte tenu que la première étape de la méthode consiste à réaliser un choix multicritère, des interviews de spécialistes de l'analyse multicritère pourraient aussi apporter un éclairage complémentaire intéressant. En lien avec l'analyse multicritère inscrite dans la méthode proposée pour la hiérarchisation de substances préoccupantes (section B.1), l'opportunité de développer un aspect participatif pour le potentiel choix de l'usage de renaturation me paraît un aspect intéressant à développer ;
- des retours d'expériences seront collectés auprès des chef de projets qui auront commencé à mettre en œuvre de premières applications de la méthode proposée.

Négociations avec les acteurs du domaine des SSP

Du point de vue opérationnel, les prochaines étapes incluent des échanges entre le ministère de l'Écologie et des représentants des branches professionnelles concernées, notamment issues des domaines des sites et sols pollués (par exemple : Union des professionnels de la dépollution des sites (UPDS)), de la fonctionnalité des sols et de la biodiversité en milieu urbain (par exemple : Union professionnelle du génie écologique (UPGE)). L'objectif de ces échanges, ainsi que des négociations associées, sera d'aboutir à une méthode nationale de référence applicable et appliquée par les différents acteurs impliqués. Dans ce contexte, l'éclairage du GT relatif aux sites et sols pollués du Conseil supérieur de prévention des risques technologiques (CSPRT) me paraît être un potentiel complément très utile.

Le ministère chargé de l'Écologie aura besoin d'un appui technique au cours de ces négociations. Dans la logique générale des missions d'appui de l'Ineris à la DGPR, et sur la base de mon expérience d'appui auprès du Bureau santé-environnement (BSE, aujourd'hui Bureau de l'appui aux politiques publiques (BAPP)) lors de négociations avec les représentants des fabricants de meubles et de désodorisants combustibles (à l'occasion d'un projet d'étiquetage sur leurs émissions dans l'air intérieur (section C.2)), cet appui technique pourra inclure des

compléments d'études, en fonction des questions et des objections soulevées pendant les échanges. Ces compléments d'études pourraient, le cas échéant, considérer les données complémentaires fournies par certaines entreprises privées ou par leurs fédérations, collectées au cours de leurs propres projets.

Ces échanges pourraient également être l'occasion de questionner certains aspects caractéristiques de l'actuelle méthodologie nationale de gestion des SSP [247], avec le nouvel angle de réflexion qu'apporte l'usage de renaturation. Par exemple, d'après cette méthodologie nationale, « *la priorité consiste d'abord à déterminer les modalités de suppression des pollutions concentrées, plutôt que d'engager des études pour justifier leur maintien en l'état* » [55]. L'opportunité de cette priorité de principe pourrait être rediscutée, et des nuances ou des exceptions pourraient être considérées. Par exemple, dans le cas d'une friche laissée en libre évolution, présentant des pollutions concentrées mais dans un contexte où la dispersion des polluants est très faible (par exemple : pas d'envol de poussières ou de lixiviation vers les eaux), où des bioindicateurs ne montrent pas d'effet délétère et où des écosystèmes d'intérêts fonctionnels ont été recensés [248-251], faut-il forcément donner la priorité à un excavation des terres polluées ? Il me semble que la question mérite d'être approfondie et discutée (j'observe qu'elle fait l'objet de débats insuffisamment informés autour de moi), d'autant plus que la règlementation en vigueur mentionne des dérogations possibles, notamment en cas d'impact environnemental significativement positif. En ce sens, le code de l'environnement mentionne : « *Les mesures de gestion de la pollution des différents milieux impactés sur le site et, le cas échéant, hors du site, comprennent au moins le traitement des sources de pollution et la suppression des pollutions concentrées […]. Par dérogation à l'alinéa précédent, l'exploitant peut proposer, dans son mémoire de réhabilitation, le maintien sur le site d'une ou de plusieurs zones de pollutions concentrées, lorsque sont réunies les conditions suivantes :*

1° Le maintien sur le site ne porte pas atteinte aux intérêts mentionnés à l'article L. 511-1 et, le cas échéant, à l'article L. 211-1 ;

2° Le maintien sur le site inclut la coupure des voies de transfert des pollutions concentrées ;

3° Le bilan environnemental global du maintien sur le site des pollutions concentrées est plus favorable que celui de leur suppression […] » (articles R. 512-39-3 et R. 512-46-27 du code de l'environnement).

Indicateur de bénéfices sanitaires

La première étape de la méthode proposée consiste en un choix multicritère du futur usage du site, débouchant ici sur le choix d'un usage de renaturation. Parmi les critères considérés figurent les résultats disponibles d'ERS et d'ERE (évaluation des risques pour les écosystèmes) ; pour les différents usages considérés initialement, ces résultats caractérisent les risques sanitaires et environnementaux associés, c'est-à-dire les possibilités ou les probabilités d'effets néfastes pour la santé des personnes et des écosystèmes en présence. De plus, cette caractérisation est traduite à l'aide d'indicateurs quantitatifs [52, 252-254] (par exemple : QD, ERI, IdP[22], PEC/PNEC([23])) associés à de critères d'acceptabilité. En particulier, ces

[22] Indice de préoccupation

[23] PEC (de l'anglais *Predicted Environmental Concentration* ; concentration environnementale prédite) / PNEC (de l'anglais *Predicted No Effect Concentration* : concentration sans effet prédite)

indicateurs ne considèrent pas les potentiels effets bénéfiques pour la santé associés aux environnements naturels. S'il n'est théoriquement pas impossible que ces aspects soient considérés dans le choix multicritère de l'usage retenu pour le site étudié, il me paraît raisonnablement envisageable qu'ils ne fassent pas souvent partie des réflexions en pratique, notamment à cause de l'absence de quantification associée et formellement reconnue.

Dans ce contexte, il me semble important de réfléchir à l'élaboration d'un indicateur qui caractériserait formellement les potentiels bénéfices associés aux espaces de nature créés avec l'usage de renaturation. Compte tenu que la littérature sur les effets bénéfiques du contact avec la nature est bien moins fournie que celle associée aux effets délétères des polluants environnementaux, cet indicateur serait probablement moins précis qu'un ERI, par exemple. Néanmoins, le nombre d'aspects caractérisant un environnement naturel (notamment : ouverture[24] [255], présence et densité de la végétation, présence d'eaux de surface, luminosité, surface de l'environnement naturel, etc.) pourrait être largement moins élevé que le nombre de substances artificielles produites (> 100 000, rien que sur le marché européen), ce qui est un élément de contexte favorable à l'élaboration d'un tel indicateur.

Par exemple, les compléments d'étude sur l'opportunité et la faisabilité d'un indicateur de bénéfices sanitaires pourraient inclure les étapes suivantes :

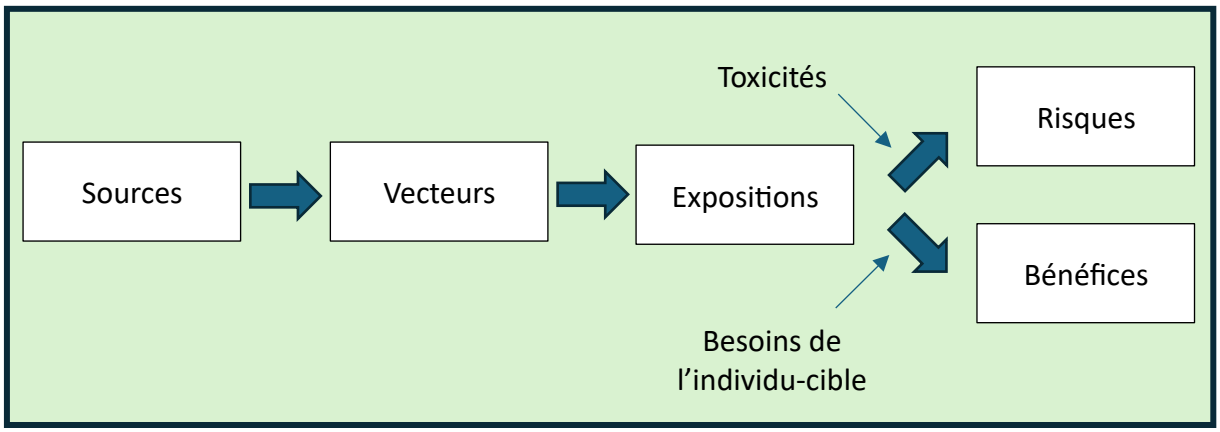
- recensement des principales caractéristiques des environnements naturels qui sont associées à des effets bénéfiques dans la littérature scientifique [68, 238-240, 256] ;
- pour chaque lien entre une caractéristique et un effet bénéfique, évaluation du niveau de preuves associé. Pour ce faire, la pyramide de niveaux de preuves utilisée en médecine fondée sur les preuves (*Evidence-Based Medicine* - EBM) pourrait être un point de repère utile [257] ;
- élaboration d'un score caractérisant l'ampleur des bénéfices associés à un espace de nature créé avec un usage de renaturation. Ce score tiendrait compte de la surface créée, des impacts positifs associés aux caractéristiques de cet espace (gains sanitaires associés, niveaux de preuves associés), de l'ampleur de la population pouvant être au contact de cet espace, etc.

[24] Capacité à offrir la possibilité d'un champ visuel ouvert sur le paysage, sur le ciel et la profondeur de l'espace de nature, sans obstacle majeur.

F. Indépendance des organismes publics d'évaluation des risques sanitaires : fiabiliser les travaux d'expertise et contribuer à restaurer la confiance des parties prenantes

« *Le chercheur examine tous les dossiers avec impartialité, en déclarant ses liens d'intérêt et en se récusant s'il constate un conflit potentiel d'intérêts, incompatible avec l'exercice impartial de l'évaluation.* »

Charte nationale de déontologie des métiers de la recherche [258]



Karr *et al. Environmental Sciences Europe* (2023) 35:96
https://doi.org/10.1186/s12302-023-00760-1
Environmental Sciences Europe

RESEARCH Open Access

Management of links of interest in European Union expertise authorities dealing with plant protection products: comparative analysis and recommendations

Guillaume Karr[1,5], Giovanni Prete[2,5], Soraya Duboc[3,4,5] and Denis Zmirou-Navier[4,5*]

Un résumé de ces travaux est proposé ci-après, suivi d'une analyse réflexive. Le texte complet de l'article associé est disponible en fin de manuscrit, dans la section intitulée Copies des travaux les plus importants, qui débute à la page 156.

F.1. Résumé des travaux

Introduction

Dans le contexte du processus d'expertise conduisant aux autorisations de mise sur le marché (AMM) de produits phytopharmaceutiques (PP) au sein de l'Union européenne (UE) - processus qui s'appuie notamment sur les contributions des autorités compétentes (AC) des différents États membres - il a été identifié :

- des différences significatives entre AC quant aux règles de gestion des liens d'intérêt (LI) des personnes impliquées dans ce processus ;
- des écarts entre les règles adoptées par les AC et les bonnes pratiques retenues en matière de gestion des LI par l'Autorité européenne de sécurité des aliments (EFSA) [259].

Ces différences et écarts pourraient avoir une influence sur les conclusions des expertises menées, et donc sur la qualité des évaluations des risques sanitaires et environnementaux, selon les États membres qui ont le mandat d'être rapporteurs ou corapporteurs de dossiers auprès de l'EFSA. Or, une fois l'homologation d'une « substance active » accordée par la Commission européenne, sur avis de l'EFSA, elle peut donner lieu à une AMM d'un PP la contenant, qui peut alors circuler dans l'ensemble de l'UE, notamment en France.

L'objectif de ces travaux était de réaliser un premier état des lieux et une analyse comparative des règles de gestion des LI existantes dans les AC de l'UE. En matière de modalités pratiques, ces travaux se sont déroulés entre 2021 et 2023. Ils ont notamment été réalisés en collaboration avec Denis Zmirou-Navier et Giovanni Prete, pour la cnDAspe.

Méthode

Afin de caractériser les règles de gestion des LI dans les AC, 18 critères ont été élaborés par un GT dédié :

- en s'inspirant notamment des règles retenues par l'EFSA ;
- sur la base de propositions et de bonnes pratiques observées par les membres du GT dans certaines AC ;
- après examen collégial et validation par la cnDAspe.

L'ensemble des 18 critères retenus inclut notamment les critères suivants :

- Une déclaration publique d'intérêt (DPI) doit-elle être renseignée préalablement à un recrutement par l'AC ?
- Les critères d'analyse des liens d'intérêt sont-ils en libre accès sur Internet ?
- Les DPI des personnes en lien avec le processus d'AMM sont-elles en libre accès sur Internet ?
- Quelle est la durée de la période passée couverte par la DPI ?
- Quelle est la structure en charge de l'analyse des DPI renseignées ?
- Y-a-t-il un délai minimal avant la possibilité d'accepter une nouvelle activité pouvant présenter un conflit d'intérêts avec les activités de l'AC ?

- Y-a-t-il des audits réguliers de la mise en œuvre des règles de gestion des LI ?
- Le contenu renseigné dans les DPI fait-il l'objet de certaines vérifications ?

Dix AC d'États membres ont été étudiées : Anses (France), Bfr (Allemagne), Ctgb (Pays-Bas), KEMI (Suède), Nébih (Hongrie), Tukes (Finlande), ministère polonais de l'Agriculture et du Développement rural, ÚKZÚZ (République tchèque), ministère italien de la Santé, BFSA (Bulgaria). Cette sélection d'AC a visé à obtenir un échantillon varié d'États membres, notamment en tenant compte des trois zones d'autorisation établies par la réglementation européenne : nord, centre et sud.

Résultats

Pour chaque AC étudiée, les critères retenus ont été renseignés (i) sur la base des informations disponibles sur le site Internet de l'AC considérée, le cas échéant après une traduction simple (Google Translate) des informations présentées en langue nationale ; (ii) en distinguant trois types de personnes : experts externes, experts internes et « cadres supérieurs et instances de gouvernance ».

Chaque AC a reçu les résultats la concernant, par un courrier officiel de la cnDAspe. Ce courrier a notamment invité les AC à (i) fournir les informations importantes et non trouvées en ligne, afin de compléter l'état des lieux et l'analyse de la cnDAspe ; (ii) corriger les potentielles incompréhensions et inexactitudes dans les résultats transmis. Le cas échéant, les corrections apportées ont été tracées, avec les justifications apportées par l'AC.

L'analyse comparative des résultats obtenus par AC a montré (i) un manque fréquent de transparence des AC concernant leurs règles de gestion des LI ; (ii) une hétérogénéité importante entre les règles de gestion des LI des AC, alors que ces AC sont chargées de missions comparables en matière d'AMM des PP ; (iii) des écarts substantiels entre les règles de gestion des LI de plusieurs AC et les bonnes pratiques promues par l'EFSA.

Discussion

Les limites actuelles des règles de gestion des LI dans l'UE pourraient rendre possible des influences externes inappropriées sur l'expertise scientifique - telles que l'influence d'organismes poursuivant des intérêts autres que celui d'une expertise scientifique de qualité - et par conséquent, avoir un impact négatif sur les options de gestion des risques relatifs à l'utilisation de PP, adoptées par les autorités nationales ou européennes.

Les règles de gestion et de transparence des LI ont besoin d'être améliorées dans l'ensemble des AC. À cette fin, un socle minimal commun de règles pourrait être défini par l'EFSA ; des recommandations ont été proposées en ce sens à la fin des travaux, sur la base des meilleures pratiques mises en œuvre par les AC étudiées, donc associées à un bon niveau de faisabilité *a priori*. De tels progrès contribueraient à promouvoir une expertise scientifique impartiale, transparente et de haute qualité, ainsi qu'à renforcer la confiance des citoyens de l'UE.

L'originalité de ces travaux se trouve notamment dans l'exercice même qui a été réalisé : dans la littérature scientifique, on ne trouve pas d'autre analyse comparative de règles de gestion des liens d'intérêt entre organismes d'expertise nationaux ayant des rôles similaires dans l'UE.

Valorisation

Ces travaux ont été valorisés avec un article dans le YearBook Santé et Environnement 2023 [50], pendant que les travaux étaient en cours, et avec une publication en 2023 dans la revue *Environmental Sciences Europe* (premier quartile pour le domaine Pollution) [51].

Ils ont également fait l'objet d'une présentation orale lors de l'évènement *PEST special committee: 4 years later, what's left to be done?* organisé par le député européen Éric Andrieu au Parlement européen en 2023.

F.2. Analyse réflexive

N'étant pas un spécialiste de la prévention des conflits d'intérêt, et ayant notamment peu d'expérience dans ce domaine (pour mémoire, il s'agissait ici d'un travail bénévole, réalisé en parallèle de mes activités principales), je ne me considère pas comme suffisamment légitime pour prendre un recul critique pertinent sur les points forts des travaux, tels que mis en avant dans la discussion de l'article. Cette section portera donc sur certaines autres limites des travaux et sur les perspectives associées, en complément de l'analyse du développement de compétences de chercheur.

Limites et pistes de progrès

Extension du périmètre restreint de l'étude

Les travaux ont porté sur un échantillon relativement restreint de 10 AC européennes : poursuivre l'étude avec un plus grand nombre d'AC permettrait donc de conforter ou de nuancer les conclusions obtenues.

Le parangonnage pourrait ensuite s'élargir à d'autres secteurs et d'autres réglementations. Par exemple, il serait intéressant d'approfondir l'exemple du secteur du médicament, notamment pour évaluer si la demande d'un socle de règles communes de la part de l'EMA (de l'anglais *European Medicines Agency*, Agence européenne des médicaments) a permis de significativement augmenter la qualité et la transparence de la gestion des LI au sein des AC nationales dans ce secteur.

Plus généralement, cet élargissement de périmètre permettrait d'avoir une vue plus représentative de la manière dont sont gérés les LI dans l'UE. En particulier, il serait intéressant d'étudier, compte tenu des limites identifiées dans le contexte des PP, s'il existe d'autres contextes avec des prescriptions réglementaires plus détaillées et plus exigeantes.

En France, un parangonnage pourrait retenir le périmètre des organismes auxquels s'applique la charte de l'expertise sanitaire, approuvée par décret en 2013 [260]. En effet, cette charte « *s'applique aux expertises réalisées dans les domaines de la santé et de la sécurité sanitaire en ce qui concerne le choix des experts, le processus d'expertise et de ses rapports avec le pouvoir de décision, la notion de lien d'intérêts, les cas de conflits d'intérêts, les modalités de gestion d'éventuels conflits et les cas exceptionnels dans lesquels il peut être tenu compte des travaux réalisés par des experts présentant un conflit d'intérêts* ».

Plus généralement, dans l'évaluation de la première stratégie nationale sur les perturbateurs endocriniens (SNPE 1), les inspections générales de la Santé et de l'Environnement indiquent : « *Le cadre déontologique applicable à l'ensemble des acteurs de la santé-environnement devrait être harmonisé. Mener, à froid, un travail de définition des règles déontologiques serait pertinent. Il devrait s'appuyer sur les dispositifs existants dans le champ de la santé humaine* » [261].

Le parangonnage pourrait enfin s'élargir à d'autres pays à l'international - par exemple : Canada, Japon, États-Unis d'Amérique, etc. - ce qui permettrait notamment de :

- situer le niveau d'exigence en Europe ou en France, par rapport au niveau d'exigence établi dans d'autres régions du monde et sur les mêmes sujets ;
- identifier d'autres bonnes pratiques appliquées dans des organismes de référence avec succès, afin de compléter la proposition de socle commun issue des travaux.

Organismes produisant les méthodes de référence, en amont de l'expertise

L'expertise réglementaire réalisée dans les comités d'experts de l'UE est encadrée par des certaines lignes directrices. C'est notamment le cas pour les tests de toxicologie réglementaires demandés aux fabricants de substances demandant une AMM ; ces lignes directrices de toxicologie sont principalement élaborées par l'OCDE [262, 263].

Pour qu'une expertise soit considérée comme protégée de potentiels conflits d'intérêt, les méthodes et les outils sur lesquels elle se fonde devraient avoir été élaborés par des organismes présentant eux aussi une gestion efficace des LI des personnes impliquées dans cette élaboration. Par conséquent, les travaux réalisés pourraient être complétés par une étude portant sur la phase amont des expertises dans les AC, au niveau de la conception des méthodes et des outils sur lesquels ces expertises s'appuient. Ceci est d'autant important lorsque certains outils sont imposés aux experts, comme c'est le cas pour certaines lignes directrices portant sur des tests de toxicité réglementaires.

Puisque que je participe aux travaux de la WPEA de l'OCDE, je peux témoigner qu'aucune DPI ne m'a été demandée, que ce soit lors de mon intégration initiale ou avant les discussions sur des travaux en cours. À titre d'illustration, la grille de critères de référence du projet a été appliquée au cas de l'OCDE (avant le début de ma participation à la WPEA), afin de produire un premier exemple de ce qui pourrait être une suite intéressante aux travaux réalisés [49]. En première approche, ce travail complémentaire s'est focalisé sur le Groupe de travail des coordinateurs nationaux du programme des lignes directrices pour les essais (*Working Party of the National Coordinators for the Test Guidelines Programme* – WNT), *« en raison de son rôle majeur dans l'élaboration de standards pour l'évaluation des risques des substances chimiques, via son programme « Lignes directrices pour les essais des produits chimiques »* » [49].

Ce premier travail complémentaire a notamment conclu que les documents décrivant les règles de gestion des LI n'étaient pas rendus publics sur le site Internet de l'OCDE, s'ils existent. De plus, si la liste des membres du WTN est publique, « *la composition des différents groupes de travail qui élaborent les propositions de tests de caractérisation des dangers et des expositions (Working Party on Hazard Assessment (WPHA), Working Party on Exposure Assessment (WPEA), etc.), pour validation par le WNT, n'est pas accessible, pas plus que leurs*

DPI, s'il en est » [49]. Enfin, l'OCDE n'a pas répondu au courrier de la cnDAspe l'informant des résultats de l'étude et sollicitant la transmission d'informations complémentaires.

Autres caractéristiques de l'indépendance de l'expertise

D'après l'Article L. 1452-1 du code de la santé publique, « *l'expertise sanitaire répond aux principes d'impartialité, de transparence, de pluralité et du contradictoire* » : la bonne gestion des LI est nécessaire mais non suffisante à assurer l'indépendance de l'expertise, bien entendu. L'amélioration de la gestion des LI dans les agences d'expertise de l'UE n'est qu'une des nombreuses actions [264-267] (par exemple, maintenir le financement public de la recherche pour renforcer l'expertise réglementaire, protéger les éditeurs scientifiques des influences non scientifiques, etc.) qui doivent être prises pour atteindre l'objectif de protéger les évaluations des risques sanitaires contre l'influence indue des acteurs économiques privés [268-272].

La méthode qui a été mise en œuvre pour les présents travaux est transversale et peut s'appliquer à d'autres composantes de l'indépendance de l'expertise, qui pourraient donc être étudiées de la même façon. Par exemple, les aspects structurels de l'indépendance de l'expertise pourraient être investigués au sein des États membres de l'UE. C'est notamment le cas du principe de séparation entre évaluation des risques et gestion des risques [153], qui a fait l'objet de nombreux débats en France, notamment à l'occasion :

- du transfert de la compétence nationale pour la délivrance des AMM des PP, du ministère chargé de l'Agriculture vers l'Anses [273]. Depuis, « *l'Anses évalue l'efficacité et les risques que l'utilisation des produits représentent pour la santé humaine et les écosystèmes et elle statue sur des demandes d'AMM. Ainsi, elle délivre, refuse et retire les autorisations de mise sur le marché des produits phytopharmaceutiques pour la France* » [274] ;
- de la fusion de l'ASN et de l'IRSN pour créer l'ASNR. Les préoccupations associées ont notamment porté sur les liens entre gestion des risques, expertise et recherche.
  Le projet de fusion a fait l'objet d'une saisine de la cnDAspe en 2023, traitée par un groupe de travail dédié auquel j'ai eu l'opportunité de participer [48].

De plus, l'article L. 1452-1 du code de la santé publique me semble indirectement rappeler que l'indépendance de l'expertise est au service de la qualité de l'expertise ; en particulier, les processus mis en place pour améliorer l'indépendance de l'expertise ne doivent donc pas conduire à entraver la qualité de sa mise en œuvre. Une fois un gain de transparence obtenu sur la composition des groupes d'experts impliqués dans l'ERS des PP au sein des AC de l'UE, il serait intéressant de vérifier que ces groupes rassemblent bien l'ensemble des compétences nécessaires à la réalisation d'évaluations de qualité. En particulier, des études complémentaires pourraient viser à vérifier que de plus fortes contraintes associées à une meilleure gestion des LI n'épuisent pas le vivier d'experts pertinents, ou tout du moins, pas de manière récurrente. Dans le cas contraire, ces aspects pourraient être aussi intégrés formellement aux règles de bonne gestion des LI, avec des critères spécifiques. En ce sens, le comité de déontologie et de prévention des conflits d'intérêts (CDPCI) de l'Anses a soulevé le paradoxe des missions des chercheurs, qui sont à la fois incités à travailler avec le secteur privé et à participer à des expertises indépendantes : « *le CDPCI […] n'a pu que constater le paradoxe auquel l'expertise est soumise. D'un côté, la plus grande rigueur est demandée en matière de choix d'experts sans conflits d'intérêts ; de l'autre, les chercheurs et enseignants – chercheurs qui constituent l'essentiel du vivier d'experts – sont fortement encouragés à travailler avec ou*

pour l'industrie dans le but légitime de transformer les connaissances théoriques en progrès pour les sociétés » [275]. Plus généralement, selon le Pr Robert Barouki, « *l'Anses a du mal à trouver des experts qui n'aient pas, d'une manière ou d'une autre, un lien d'intérêt, parce que dans certains domaines, il existe peu de chercheurs et presque tous sont sollicités très fortement par l'industrie* » [126]. La gradation des niveaux de lien d'intérêt évoquée dans l'article peut contribuer à gérer cette situation délicate.

Développement de compétences de chercheur

Ces travaux ont été l'occasion de développer ou de renforcer plusieurs compétences types associées aux diplômés du doctorat (Tableau 1). Par exemple :

- faire le point sur l'état et les limites des savoirs au sein d'un secteur d'activité déterminé, aux échelles nationale et internationale (Bloc 1), avec cet exercice de bilan sur ce qui est connu quant à la gestion des LI dans les AC de l'UE en appui à l'EFSA ;
- garantir la validité des travaux ainsi que leur déontologie et leur confidentialité en mettant en œuvre les dispositifs de contrôle adaptés (Bloc 2), avec l'application des bonnes pratiques de gestion des LI au sein du GT de la cnDAspe. Par exemple, je n'ai pas réalisé d'analyse des règles de gestion des LI de l'Ineris, car mes liens d'intérêt en tant que salarié de l'Ineris m'auraient placé en position de conflit d'intérêt dans le cadre de cette analyse ;
- mettre en œuvre l'ensemble des dispositifs de publication à l'échelle internationale permettant de valoriser les savoirs et connaissances nouvelles (Bloc 3).
  Les travaux ont fait l'objet d'un article écrit dans une revue internationale de référence et d'une présentation orale lors d'un colloque en anglais organisé au Parlement européen en 2023 ;
- mobiliser les techniques de communication de données en « open data » pour valoriser des démarches et résultats (Bloc 3).
  L'article scientifique produit a été publié en Open Access ; les frais de publication (*Article Processing Charges* - APC) ont été financés pour plus de la moitié par les fonds propres des auteurs. Par ailleurs, cet article est accompagné du détail des résultats et des réponses des AC en matériaux supplémentaires, également accessibles publiquement à partir de l'article en ligne ;
- disposer de la curiosité, de l'adaptabilité et de l'ouverture nécessaire pour se former et entretenir une culture générale (Bloc 4).
  Produire un travail et un article scientifique dans un domaine dont on n'est pas spécialiste peut être vu comme une forme d'adaptabilité et d'ouverture ;
- rendre compte et communiquer en plusieurs langues des travaux à caractère scientifique et technologique en direction de publics ou publications différents, à l'écrit comme à l'oral (Bloc 5).
  Les travaux ont fait l'objet d'un article en français, d'un article en anglais et d'une présentation orale en anglais au Parlement européen. Cette dernière a eu lieu devant un public composé de députés, de scientifiques, de membres d'agences françaises et européennes, ainsi que de représentants d'organisations non gouvernementales (ONG).

Par ailleurs, avec ce que j'ai pu apprendre au cours de ces travaux, j'applique dorénavant de bien meilleurs critères de gestion des LI au sein de mes propres projets, et de manière bien plus proactive. Je crois que ces aspects font maintenant partie de ma grille d'analyse spontanée des projets scientifiques qui me sont présentés, ce qui me procure « une compréhension, un recul et un regard critique » (Bloc 4) bien meilleurs sur ces aspects de la déontologie et de l'indépendance de l'expertise.

3. Perspectives de la thèse

« *L'environnement est fondamental pour la santé humaine.* »

United Nations Environment Program (UNEP) [276]

Cette partie 3 s'articule autour de trois sections principales. Tout d'abord, la section A rassemble les principaux éléments identifiés pour répondre à la problématique générale de la thèse - « *Comment la démarche ERS peut-elle contribuer à l'élaboration de politiques publiques visant des environnements favorables à la santé ?* » : (i) les éléments de réponse illustrés par les études de cas présentées dans la partie 2, puis (ii) d'autres éléments de réponse, suggérés par ces études de cas et qui me paraissent également intéressants. Cette étape de bilan des apports des travaux réalisés sera complétée par une synthèse des compétences de chercheurs développées et renforcées à cette occasion.

Dans un second temps, la section B discute des principales limites - celles que j'ai pu identifier - des apports possibles de la démarche ERS pour l'élaboration de politiques publiques en faveur d'environnements favorisant la santé. Les discussions de ces limites seront suivies de propositions d'axes de progrès correspondant.

Enfin, la section C discute de mes principales idées de nouveaux apports, que j'envisage de proposer avec de futurs travaux.

A. Synthèse des types d'apports issus des études de cas présentées

A.1. Éléments de réponses à la problématique générale de la thèse

« *[Le risque est] un événement non encore survenu qui motive l'action* »

Ulrich Beck [277]

Synthèse des éléments de réponse illustrés par les études de cas présentées

Cette section rassemble les principaux apports de la démarche ERS, qui peuvent contribuer à l'élaboration de politiques publiques en santé environnementale et qui ont pu être illustrés avec les études de cas de la partie 2. Ces apports sont accompagnés de rappels succincts et, pour accéder à une description plus détaillée, de renvois vers les sections correspondantes dans la partie 2.

Exercice prospectif

D'après le Centre international sur la gouvernance des risques (*International Risk Governance Center* - IRGC), « *l'invention du risque en tant que construction mentale repose sur la conviction que l'action humaine peut prévenir les dommages à l'avance. Les Humains ont la capacité de concevoir différents futurs, c'est-à-dire de construire des scénarios qui servent d'outils à l'esprit humain pour anticiper les conséquences et modifier, avec des limites liées à la nature et de la culture, le cours des actions en conséquence* » [278]. Dans cette perspective, la démarche ERS permet d'étudier des scénarios d'exposition pouvant se dérouler pendant les (dizaines) d'années à venir, notamment en s'appuyant sur différents types de modélisations, et en pouvant considérer différentes hypothèses d'émissions futures. Ainsi, cette démarche offre un éclairage complémentaire aux retours d'expériences issus d'incidents non voulus et aux mesures dans les milieux de transfert ou d'exposition, un éclairage qui présente l'avantage de ne pas attendre l'apparition d'effets ou de contaminations pour agir. En d'autres termes, en complément de l'observation, la démarche ERS propose une forme d'exploration/prévision.

Cet aspect prospectif [52] permet aux décideurs publics d'élaborer des politiques publiques de manière proactive, répondant à une logique de prudence[25] - notion considérée ici comme incluant la prévention et la précaution [279] - sans attendre d'avoir à compter suffisamment de

[25] « *La précaution vise à limiter les risques hypothétiques ou potentiels, tandis que la prévention s'attache à contrôler les risques avérés. Précaution et prévention sont deux facettes de la prudence qui s'imposent dans toutes les situations susceptibles de créer des dommages. La précaution se distingue de la prévention du fait qu'elle opère en univers incertain* » - Philippe KOURILSKY, Geneviève VINEY - « Le principe de précaution » - rapport au Premier ministre – 1999.

victimes (notamment afin d'atteindre une taille d'échantillon permettant d'obtenir des résultats statistiquement significatifs) et intégrant une vision de long terme. Cette proactivité peut inclure l'étude de différentes options de mesures de gestion envisagées par ces décideurs.

Par exemple, cet apport a été illustré avec le contexte de :

- la gestion des émissions des ICPE (section 2.D.1), où les autorités n'attendent pas que des effets apparaissent dans des populations riveraines avant de réglementer les émissions d'une ICPE ;
- l'usage de renaturation dans la gestion des SSP (section 2.E.1), où la méthode proposée demande de s'assurer en amont du projet de la maîtrise des expositions à venir.

Application du principe de spécificité

Le Silver Book [154] souligne la nécessité de comprendre les enjeux en fonction du contexte de l'étude, ce qui donne un rôle central au schéma conceptuel (section 2.A.3) dans la démarche ERS. Pour mémoire, l'objectif de ce schéma est de décrire les liens entre sources, milieux environnementaux et personnes-cibles dans le cas particulier de la situation étudiée. Le schéma conceptuel cadre le reste de l'étude en fonction des spécificités en présence [280].

Par ailleurs, contrairement au cas de la réalisation de mesures dans les milieux environnementaux, caractérisant l'influence présente et potentiellement passée de l'ensemble des sources en présence, les modélisations sur lesquelles s'appuie l'ERS permettent de caractériser les risques futurs et attribuables aux sources étudiées [52].

Enfin, d'après le guide Évaluation détaillée des risques (EDR) [156], le principe de spécificité de l'ERS explique l'absence de standardisation poussée de la part des pouvoirs publics : « *d'une manière générale […] ce chapitre sur l'évaluation des risques pour la santé liés aux sites et sols pollués ne saurait prédéfinir des scénarios, modèles ou outils standards. Il a pour but de définir des règles de bonnes pratiques et de présenter les éléments qu'il est nécessaire de trouver au minimum dans une étude* ».

Par exemple, cet apport a été illustré avec le contexte de la gestion des émissions des ICPE où, pour obtenir une autorisation d'exploiter, les « critères d'acceptabilité » [162] à satisfaire portent sur les risques spécifiques à l'ICPE étudiée (section 2.D.1). La contamination multi-sources de l'environnement de cette ICPE (dégradations plus ou moins fortes, pouvant mener à de potentielles incompatibilités avec les usages) constitue un éclairage complémentaire, pouvant justifier de moduler le contrôle des émissions : VLE, surveillance à l'émission et, si besoin, surveillance dans certains milieux environnementaux.

Application du principe de transparence

Dans la démarche ERS, le principe de transparence porte à la fois sur :

- le processus de réalisation, où les hypothèses, les modèles et les choix retenus doivent être décrits et expliqués : l'évaluateur explicite ce qu'il fait dans l'étude ;
- le résultat de ce processus, qui vise à clarifier la situation étudiée, en montrant ce qui est connu, ce qui ne l'est pas et les incertitudes en présence. En ce sens, l'ERS participe à éclairer une situation souvent complexe, à la rendre plus transparente.

Par exemple, d'après la version 2003 du guide ICPE, « *étant donné qu'il n'existe pas une connaissance absolue, le choix des hypothèses, des outils à utiliser, du degré d'approfondissement nécessaire relève du jugement et du savoir-faire de l'évaluateur face à chaque cas d'étude particulier. La règle de l'évaluation des risques est que ces choix soient cohérents et expliqués par l'évaluateur, afin que la logique du raisonnement puisse être suivie et discutée par les différentes parties intéressées. L'objectif de transparence des termes de la conclusion de l'étude sera ainsi respecté* » [151].

Le principe de transparence est inhérent à la démarche ERS : chaque étude de cas en a donc donné une illustration spécifique.

Adaptabilité

Les études de cas présentées se sont inscrites dans des contextes variés - hiérarchisation de substances préoccupantes, qualité des environnements intérieurs, étiquetage de produits de consommation, gestion des émissions des ICPE, usage de renaturation pour les SSP - ce qui illustre l'adaptabilité de la démarche ERS en fonction du contexte, comme le montre également sa structure générique.

L'adaptabilité de la démarche ERS porte également sur le degré d'approfondissement variable avec lequel elle peut être déclinée, comme y invite le principe de proportionnalité par exemple (section 2.A.3). Au sein d'une même étude, ce degré peut augmenter par itération, comme l'illustrent les évaluations réalisées pour les produits de consommation courante (section 2.C.1).

De plus, la proposition de schéma SVC augmenté (Figure 9) représente aussi une forme d'adaptabilité, suivant la dynamique d'élargissement du périmètre classique de la santé environnementale aux influences positives de l'environnement.

La notion de « cible » du continuum SVC est également adaptable à différents contextes. Par exemple, si elle correspond généralement à des humains types ou à des personnes spécifiques, elle peut également désigner une espèce animale, une zone protégée ou un écosystème spécifique. En ce sens, l'adaptabilité de la démarche en fait un outil intéressant dans le contexte Une seule santé (« *One health* ») [10, 11], croisant santé humaine, santé animale et santé des écosystèmes.

Un autre aspect de cette adaptabilité réside dans la possibilité d'utiliser l'ERS (i) en tant qu'élément d'un ensemble de critères participant à la décision (des critères pouvant par exemple exprimer d'autres notions d'intérêt ou bien contribuer à palier certaines limites de l'ERS (section B, ci-après)) ou (ii) de manière autonome, comme l'a illustré le projet de hiérarchisation de substances préoccupantes (section 2.B.1). Dans le cas d'un ensemble de critères à considérer, le gestionnaire garde une plus grande liberté dans son choix politique, tout en pouvant mieux expliciter ce choix et le justifier. Avec les mots de William Dab, ancien DGS : « *Il faut reconnaître que la protection de la santé n'est pas le seul objectif des politiques d'environnement. D'autres enjeux méritent légitimement d'être pris en considération comme la défense de l'emploi, les contraintes budgétaires, les valeurs sociales et culturelles, les possibilités techniques. Cependant, les arguments de santé publique sont ceux qui apportent la meilleure légitimité aux décisions* » [75].

En outre, la démarche ERS permet d'étudier les risques attribuables à différentes composantes du continuum SVC. Par exemple : sources d'émissions, milieux de transfert et d'exposition, substances ou types d'effet, comme l'illustre les travaux sur les produits de consommation (section 2.C.2). Ces différentes composantes peuvent faire l'objet d'hypothèses, de choix ou de modélisations différentes, toutes testables pour évaluer leurs influences sur les risques calculés. Des études de sensibilité peuvent également être réalisées à chaque étape, en faisant varier des paramètres caractéristiques de ces composantes.

Hiérarchisation des enjeux

Puisque des indicateurs de risques peuvent être calculés pour chaque composante du schéma conceptuel, ces composantes peuvent donc ensuite être hiérarchisées entre elles, en fonction des risques quantifiés. Cette hiérarchisation permet ensuite d'identifier les composantes qui contribuent le plus aux risques calculés.

Par exemple, dans le cadre de la gestion des émissions des ICPE (section 2.D.1), l'ERS réalisée permet aux inspecteurs DREAL et DDPP de prioriser les efforts de contrôle des émissions (réduction et surveillance) sur les substances, milieux de transfert, milieux d'exposition, lieux et populations associés aux risques les plus élevés [281]. Ceci contribue à l'efficacité et à l'efficience de l'instruction et de la gestion des émissions. En ce sens, la circulaire du 9 août 2013 souligne : « *La démarche d'évaluation des risques sanitaires permet de hiérarchiser les différentes substances émises par un site, leurs sources et les voies d'exposition, en vue de définir des stratégies de prévention et de gestion spécifiques à chaque installation. Il s'agit d'un outil de gestion et d'aide à la décision. Or, il est trop souvent constaté que l'étape calculatoire ultime d'évaluation des risques sanitaires est celle qui retient le plus l'attention, notamment en termes de communication envers le public* » [162]. De plus, si les valeurs repères usuelles ($QD_{chronique} < 1$, $ERI < 10^{-5}$, $QD_{aigu} < 1$) peuvent permettre de définir des critères d'acceptabilité [162], l'écart d'un indicateur de risque pour un individu type (chronique à seuil, ou chronique sans seuil, ou aigu) avec la valeur usuelle d'acceptabilité correspondante (chronique à seuil, ou chronique sans seuil, ou aigue) permet également de caractériser le niveau de préoccupation et d'urgence à agir, en complément de la gravité perçue de l'effet critique. Par exemple, (i) pour un même effet toxique, une situation correspondant à un QD de 150 sera considérée comme plus prioritaire pour l'action publique qu'une situation correspondant à un QD de 1,5 ; (ii) pour un même QD, la priorité sera probablement donnée à un effet délétère sur les fonctions cérébrales par rapport à une irritation oculaire ; (iii) et bien entendu, une situation correspondant à un QD de 150 et à un effet délétère sur les fonctions cérébrales pourra être considérée comme bien plus prioritaire pour l'action publique qu'une situation correspondant à un QD de 1,5 et à une irritation oculaire. En d'autres termes, la démarche ERS propose un moyen de répondre aux questions courantes « *est-ce que la situation est préoccupante ?* », et si oui, « *dans quelle ampleur ?* », ce qui est souvent plus utile en pratique que de répondre uniquement à la question « *oui ou non, la substance est-elle toxique ?* ». Répondre à cette question préliminaire est un premier pas essentiel, mais qui peut être utilement complété par d'autres connaissances visant à appuyer la gestion des risques. Ainsi, la démarche ERS peut contribuer à répondre aux critiques et aux demandes des inspections générales (« *élaborer pour 2022 une stratégie nationale de santé-environnement qui hiérarchise les priorités* » [76]), du HCSP (« *les actions et les priorités ne sont pas basées*

assez systématiquement sur des données probantes » [124]), et plus généralement, des instances décisionnelles impliquées dans la gestion du risque.

L'approche peut être affinée en tenant compte de l'incertitude et de la variabilité des différentes composantes des calculs d'indicateurs de risques. En matière de gestion des risques, plus que la mise en regard d'une valeur d'exposition et d'une valeur de toxicité pour calculer des QD et des ERI, il peut être plus éclairant de comparer un intervalle des valeurs d'exposition les plus fréquentes/probables au sein de la population étudiée et un intervalle des valeurs de toxicité les plus fréquentes/probables au sein du type de population étudiée (population générale, travailleurs, enfants en bas âge, etc.). Dans cette logique, si les données disponibles le permettent, il est possible de s'appuyer sur des intervalles de confiance.

D'autres types de critères peuvent participer à l'identification de priorités pour l'action publique, comme cela a été réalisé avec une méthode multicritère dans le projet de hiérarchisation de substances pour le PNSE3 (Section 2.B.1). Notamment : des critères techniques (par exemple : la capacité à mesurer la substance dans les milieux environnementaux), économiques (par exemple : les coûts associés aux techniques de traitement des émissions) et sociétaux (par exemple : comment se répartissent les risques au sein de la population exposée). On peut également considérer des critères liés à des aspects sanitaires imparfaitement couverts par les indicateurs calculés, tels que l'ampleur et les caractéristiques des populations les plus exposées. Par exemple : « *s'agit-il de quelques individus particulièrement exposés du fait de leur positionnement ou de leurs activités, ou d'un groupe de personnes plus important ? Y a-t-il parmi les personnes exposées des personnes plus sensibles de par leur âge ou leur état de santé (présences d'écoles, hôpitaux, maisons de retraite…) ?* » [52].

Appui à la gestion de l'incertitude

Il est parfois reproché à l'ERS les incertitudes associées. Il s'agit d'un contre-sens : c'est parce qu'il y a de fortes incertitudes qu'une ERS est mise en œuvre. Dans un contexte de connaissances incomplètes et de moyens limités, la démarche ERS est un moyen de gérer cette incertitude ; en complément du recensement et de la mise en cohérence des connaissances disponibles, l'ERS explicite les incertitudes associées et caractérise leur influence sur les conclusions obtenues. Dans cette logique, le Silver Book souligne que « *les décisions visant à protéger la santé publique et l'environnement ne peuvent attendre des connaissances scientifiques « parfaites ». […] Il est donc important que les évaluations des risques intègrent les meilleures informations scientifiques disponibles, de manière scientifiquement rigoureuse, et qu'elles identifient et décrivent les incertitudes associées à ces informations de manière utile pour les décideurs* » [154].

Les incertitudes sont classiquement traitées selon différents niveaux d'approfondissement (en application du principe de proportionnalité), à chacune des étapes de l'ERS et selon différents types de sources d'incertitudes [282, 283]. Par exemple : données, hypothèses, modèles [52, 284]. Au final, le traitement des incertitudes « *doit correspondre à une réflexion argumentée sur le degré de vraisemblance et de prudence des éléments de l'étude les plus sensibles* » [285].

En pratique, par exemple dans le contexte des ICPE et des SSP, une manière classique de traiter les incertitudes liées à certains paramètres de la modélisation des expositions consiste à :

1. identifier les principaux contributeurs au risque total quantifié.
   Par exemple : ingestion de cadmium présent dans les salades cultivées dans une certaine zone sous l'influence des émissions du site ; ingestion de dioxines présentes dans des œufs issus de poules élevées dans une autre zone sous l'influence des émissions du site ; inhalation de chrome VI au niveau du terrain de sport à proximité immédiate du site ;
2. pour ces principaux contributeurs, identifier les paramètres les plus sensibles[26].
   Si besoin, une étude de sensibilité de première approche peut être conduite, par exemple en faisant varier chaque paramètre de 10 % et en observant les variations correspondantes sur les risques quantifiés ;
3. pour les paramètres les plus sensibles des principaux contributeurs au risque total quantifié (parfois appelés « *facteurs déterminants* » [282] ou « *paramètres-clés* » [52, 284]), faire varier leur valeur respective en fonction des données existantes dans la littérature scientifique et technique (« incertitude paramétrique ») et applicables à la situation étudiée (principe de spécificité), puis observer les variations correspondantes sur les risques quantifiés.
   Pour certains paramètres, le traitement des incertitudes peut s'appuyer sur une distribution de probabilité, dans les cas où suffisamment de données sont disponibles dans la littérature scientifique et technique. Néanmoins, d'après le retour d'expérience des ingénieurs d'études de l'Ineris, ce cas de figure est assez rare dans le contexte des ICPE et des SSP.

Le traitement des incertitudes permet ainsi d'identifier les paramètres les plus sensibles sur les résultats et l'ampleur de cette sensibilité, ce qui caractérise la robustesse des conclusions et donc une partie de l'interprétation qu'on peut en faire. En d'autres termes, ce traitement permet « *de conforter les conclusions ou au contraire de les nuancer. [Il] doit être utile pour la compréhension des facteurs influençant les résultats, et* in fine *donner un sens supplémentaire aux résultats pour la gestion des risques* » [52] ; ou encore, plus simplement, ce traitement vise à ce « *que le lecteur puisse comprendre la signification du résultat obtenu* » [156]. Et ainsi, selon le Comité de la prévention et de la précaution (CPP), « *cette zone d'incertitude sur l'évaluation du risque est caractérisable et étroite dans les cas les plus favorables, mais il existe de nombreuses situations où elle est considérable, et constitue donc une donnée importante pour le décideur* » [286].

En complément de l'incertitude paramétrique, l'étude des incertitudes porte également sur l'influence liée aux différences de représentations mathématiques entre les modèles utilisables. En effet, le rôle de l'évaluateur consiste notamment à choisir des modèles adaptés à la situation en présence (par exemple : un modèle de dispersion atmosphérique pseudo-gaussien en cas de relief peu marqué autour d'une ICPE (pentes inférieures à 10 % sur le domaine d'étude), ou des modèles plus complexes (de type eulérien ou lagrangien) dans le cas contraire [52]). La discussion des incertitudes inclut donc la question de la pertinence des

[26] c'est-à- dire ceux pour lesquels la variabilité de la valeur et/ou l'incertitude est importante et qui ont
une potentielle influence forte sur les résultats.

représentations mathématiques employées, et lorsqu'il existe plusieurs choix pertinents, la caractérisation de l'influence des choix de l'évaluateur sur les résultats.

Au final, selon le Guide EDR, l'évaluation des incertitudes fournit des éléments de réponses pour :

« - *mettre en perspective les résultats obtenus par rapport à la réalité, afin d'apporter les éléments nécessaires pour permettre la discussion ;*

- *mettre en évidence les points de l'évaluation où un effort supplémentaire dans l'acquisition de données et le travail de modélisation peut réduire de façon substantielle l'incertitude entourant le résultat* » [156].

Lorsque les incertitudes sont jugées trop élevées par rapport au niveau de confiance visé pour les conclusions, la discussion des incertitudes peut conclure au besoin de réduire les incertitudes associées à certains des paramètres les plus sensibles ; en pratique, dans le cadre des ICPE, ce besoin conduit souvent à réaliser des mesures complémentaires, à l'émission ou dans l'environnement du site [52].

Gestion des risques liés aux mélanges de substances

D'après le HCSP, « *la problématique centrale, depuis longtemps mise en avant, est l'exposition à des polluants multiples, présents dans différents milieux* » [124]. Pour caractériser les effets des expositions à des mélanges de substances, les pratiques classiques des évaluateurs de risques consistent à sommer les indicateurs de risques mono-substance en première approche, puis à comparer les sommes multi-substances obtenues aux valeurs repères usuelles ; si cette première approche ne permet pas de conclure à l'absence de situation préoccupante, alors ces sommes peuvent être affinées par mécanisme d'action et par organe cible.

Cette additivité des « expositions pondérées par leur niveau de toxicité » (ratios exposition/toxicité) correspond, pour les faibles doses des expositions environnementales couramment rencontrées, à la situation la plus souvent observée pour les mélanges de substances ayant le même mécanismes d'action et le même organe cible, en l'état actuel des connaissances [213, 214, 287]. Néanmoins, des substances de certains mélanges peuvent parfois avoir des interactions significatives : d'après l'Anses, « *il peut s'agir d'interactions positives (synergie ou supraadditivité) ou négatives (antagonisme ou infra-additivité). Ces interactions sont souvent étudiées pour des mélanges simples (n = 2) et à des doses plutôt élevées, pour comprendre les aspects mécanistiques explicatifs. […] L'hypothèse d'additivité est utilisée par défaut, sauf si des données disponibles dans la littérature la remettent en cause* » [214]. Par exemple, cet apport a été illustré avec les études des produits de consommation courante, pouvant émettre de plusieurs dizaines à quelques centaines de substances (section 2.C.2).

Lorsqu'une ERS a pour objectif de s'assurer d'une absence de situation préoccupante, la synergie (supra-additivité) constitue une problématique à enjeu souvent mise en avant. En effet, la présence d'une synergie - ou encore d'une potentialisation d'effets différents ou non identifiés - pourrait conduire l'évaluateur à conclure à un faux négatif - l'erreur la plus dommageable en termes de santé publique - c'est-à-dire à conclure à l'absence de risque préoccupant alors que ce n'est pas le cas. Néanmoins, lorsqu'une ERS vise à décrire au mieux les risques existants, l'antagonisme (infra-additivité) présente également des enjeux

significatifs, puisqu'il pourrait conduire l'évaluateur à se tromper dans l'identification des principaux contributeurs au risque total, et donc à recommander des mesures de gestion des risques moins efficaces.

Une somme d'indicateurs multi-substances et multi-sources constitue un moyen simple et de première approche pour tenir compte des effets des mélanges. Si cette possibilité reste bien préférable à celle de ne pas en tenir compte du tout, elle reste loin de pouvoir traduire la complexité des phénomènes associés (par exemple, des expositions aiguës, subchroniques, chroniques peuvent se produire de façon concomitante ou séquentielle) et la variabilité des situations individuelles, surtout si le champ de l'étude s'ouvre au-delà des sources étudiées pour englober les valeurs de fond dans les milieux d'exposition.

Risque collectif

Si la démarche ERS porte souvent sur des individus types, caractérisant certaines populations spécifiques, il est aussi possible de considérer des populations dans leur ensemble et de calculer le risque collectif correspondant. Pour les effets sans seuil, les résultats de ces calculs de risques collectifs peuvent être exprimés en nombre de cas supplémentaires d'apparition d'un effet. Pour les effets à seuil, il est possible d'estimer le nombre de personnes exposées à un certain niveau de risque (par exemple : QD > 1).

En particulier, exprimer un risque en nombre de cas (maladies, décès…) attribuables à une source d'émission peut être plus parlant pour des décideurs publics - notamment comparé à un résultat du type « besoin de diminuer les émissions des produits les plus émissifs » issu des études sur les risques individuels liés aux produits de consommation courante (2.C.1). Dans une logique similaire, Claude Got souligne un retour d'expérience issu de la gestion des risques liés à l'amiante dans les années 1970-90 : « *L'analyse de la gestion du risque lié à l'amiante permet de préciser les conditions du succès d'une expertise de santé publique.* […] *Affirmer que l'amiante était cancérogène n'était pas suffisant, il fallait produire une évaluation de la mortalité attribuable ; même approximative, c'est elle qui aurait mobilisé les décideurs* » [288].

Évaluer un risque collectif ouvre également sur la possibilité de chiffrer les coûts correspondants [31, 72, 79, 220]. En ce sens, l'IGAS souligne : « *Il est pertinent aussi de mettre en lien les enjeux financiers avec les enjeux sanitaires, si ces derniers ne suffisaient pas, sur un plan éthique, à impulser l'action publique. […] Même en termes strictement financiers, les coûts induits par les pathologies liées aux atteintes portées à l'environnement suffiraient à en fonder la nécessité* » [73]. Le CGEDD souligne également que « *les coûts des risques sanitaires, très élevés, sont à mettre en regard des moyens qui permettent de les réduire* » [123]. Ce type de chiffrage a pu être réalisé à l'échelle nationale - par exemple : la pollution de l'air extérieur coûte de 70 à 100 milliards d'euros par an environ, d'après le Sénat [220] ; la pollution de l'air intérieur coûte environ 20 milliards d'euros par an, d'après l'Anses [71, 72] - et à l'échelle internationale - par exemple : l'impact sanitaire des perturbateurs endocriniens a été estimé à environ 160 milliards d'euros par an en Europe [79].

L'apport du risque collectif issu des ERS a été illustré avec le projet de hiérarchisation de substances préoccupantes (section 2.B.1), qui a inclus l'élaboration d'un indicateur de risque collectif (IRC), à partir des données disponibles sur les substances étudiées, de résultats de modélisation et de dires d'experts. En première approximation, cet indicateur a représenté un avis d'expert en matière de risque sanitaire dans un contexte de santé publique. Les substances

étudiées ont pu alors être ordonnées selon leur valeur respective d'IRC, générant ainsi une liste hiérarchisée monocritère, fondée sur la notion de risque collectif.

Aide à l'échange avec les différents acteurs impliqués

La démarche ERS explicite, étend et met en cohérence le savoir existant, participant ainsi à éclairer une situation complexe. Cet éclairage permet de fournir des éléments d'informations sur lesquels peuvent s'appuyer des échanges entre les parties prenantes impliquées.

Dans un contexte de fortes incertitudes et de potentiels conflits entre des profils d'intérêts divergents, expliquer le contenu de l'ERS prend un intérêt particulier : tenter de faire coïncider les représentations des différents acteurs peut s'avérer être un exercice difficile, mais l'ERS peut au moins contribuer à fournir des bases communes visant des échanges justes - sans asymétrie de connaissances significative entre participants. De cette manière, l'action publique pourrait viser une proactivité raisonnée et débattue.

En outre, quand l'incertitude augmente, l'explicitation des hypothèses retenues devient essentielle et la référence à des principes généraux devient plus fréquente, pour viser l'acceptabilité des décisions des pouvoirs publics. Cette référence gagne à être accompagnée d'une participation des personnes concernées au processus décisionnel [289, 290]. Par conséquent, dans ce contexte, communiquer des notions parfois complexes pour le public constitue un exercice à enjeu, et la structure de l'ERS en quatre étapes [153] peut être utile pour mener à bien cet exercice.

Par exemple, cet apport a été illustré avec le projet de hiérarchisation de substances préoccupantes (section 2.B.1), qui a inclus plusieurs phases de participation. Plus généralement, le déroulement global du projet a été accompagné par la Commission d'orientation de la recherche et de l'expertise (CORE) [291], un des organes de gouvernance de l'Ineris, qui « *a pour objectif de représenter les différents porteurs d'enjeux de la société, par l'intermédiaire des collèges dont elle est composée : Industriels, ONG/associations, Élus, État, Monde Académique et Syndicats. La mission de la CORE est d'approfondir, au regard des attentes sociétales, les enjeux et les questionnements en matière de recherche et d'expertise, afin d'enrichir les dossiers et les réflexions stratégiques de l'Institut* » [292].

L'accompagnement de la CORE s'est articulé autour de trois principaux moments d'échanges : deux points intermédiaires, puis une restitution des résultats du projet. Les échanges autour des deux points intermédiaires se sont déroulés de la manière suivante :

- envoi sous format informatique :
    - d'un rapport d'étape en version provisoire, portant sur les travaux réalisés et les questionnements en cours,
    - d'un questionnaire, invitant les membres de la CORE à formuler un avis sur différents aspects du rapport : clarté des éléments présentés, avis sur la pertinence des choix stratégiques effectués, suggestions concernant les travaux à venir ;
- échanges téléphoniques bilatéraux avec chacun des répondants, afin de clarifier certaines réponses et de s'assurer que les principales attentes ont bien été comprises ;
- réunion plénière de restitution auprès de la CORE, qui a compris les principaux points suivants :
    - synthèse des éléments essentiels du rapport d'étape,

    - présentation des réponses aux questionnaires et de la façon prévue par l'Ineris pour en tenir compte,
    - échanges libres ;
- diffusion d'un compte-rendu de réunion ;
- envoi de la version finalisée du rapport.

Ces modalités de participation ont été jugées avec un bon niveau de satisfaction par les membres de la CORE [292] : à la question « *Globalement, êtes-vous satisfait par le processus de concertation proposé par l'INERIS dans le cadre du projet Hiérarchisation de Substances ?* », 67 % des membres de la CORE ont répondu « *Tout à fait* », 33 % « *Plutôt oui* », 0 % « *Plutôt non* » et 0 % « *Pas du tout* ».

Au regard des recommandations issues du Silver Book [154], ce processus participatif aurait également gagné à être formalisé et renforcé dans la phase initiale de cadrage du travail à effectuer : « *Une bonne conception implique de rassembler les gestionnaires des risques, les évaluateurs des risques et diverses parties prenantes au début du processus pour déterminer les principaux facteurs à prendre en considération, le contexte de prise de décision, le calendrier et le degré d'approfondissement nécessaires pour garantir que les bonnes questions sont posées dans le contexte de l'évaluation. Il a été démontré que l'accent accru mis sur la planification, sur la définition de la portée et sur la formulation des problèmes conduit à des évaluations des risques qui sont plus utiles et mieux acceptées par les décideurs* » [154]. Avec une logique proche, dans le cadre des études de zone (évaluations de risques sanitaires à l'échelle d'une zone géographique, plutôt qu'à l'échelle d'un site industriel) [293], le HCSP recommande d'associer les parties prenantes lors de la phase de cadrage, tout au long du déroulé de la démarche ERS, puis au niveau de la gestion des risques : « *Les différents acteurs […], quoique impliqués dans la question à des titres et à des niveaux variés, sont fondés à exiger d'être en mesure d'exprimer leur point de vue tout au long du processus d'ERS. Aussi, l'implication des parties prenantes doit être facilitée le plus en amont possible, dès la formulation du problème qu'il s'agit d'investiguer et de résoudre s'il y a lieu ("issue framing") ; leur participation doit être maintenue pendant tout le processus de travail et d'étude, jusqu'à l'annonce des décisions prises par l'autorité compétente et le suivi de leur mise en œuvre* » [294].

Appui à la gestion des risques

Le Silver Book inscrit la démarche ERS dans un logique d'aide à la décision, en appui aux gestionnaires des risques : « *Le cadre commence par un « signal » de dommage potentiel […]. Dans le cadre du paradigme traditionnel, la question a été : « Quelles sont la probabilité et les conséquences d'un effet néfaste sur la santé (ou l'environnement) posé par le signal ? » En revanche, le cadre recommandé pose implicitement la question suivante : « Quelles options y-a-t-il pour réduire les dangers ou les expositions qui ont été identifiés, et comment l'évaluation des risques peut-elle être utilisée pour évaluer les avantages de ces différentes options ? » L'accent est donc mis sur les décisions à prendre en matière de risques* » [295].

Dans cette logique générale, la démarche ERS peut s'inscrire dans un processus réglementaire en appuyant l'aide à la décision. C'est par exemple le cas du cadre réglementaire de la gestion des émissions des ICPE en France (section 2.D.1). Dans ce positionnement d'appui au gestionnaire du risque, la démarche ERS peut notamment s'appuyer sur trois points forts :

- comme rappelé plus haut, une déclinaison pratique adaptable, et qui peut donc s'ajuster en fonction des projets considérés. Par exemple, dans des projets industriels, cette adaptation porte notamment sur les spécificités de leur site d'implantation, de leurs émissions et de leur environnement ;
- des règles simples et systématiques qui peuvent être définies à partir des résultats de l'ERS. C'est par exemple le cas des critères d'acceptabilité pour l'autorisation d'une ICPE ($QD < 1$ et $ERI < 10^{-5}$), portant sur les risques attribuables à ses émissions [162] ;
- au-delà de l'acceptabilité de la demande d'autorisation, une optimisation de l'efficacité des mesures de gestion ; en effet, les résultats de l'ERS permettent d'orienter ces mesures en se fondant sur les principales contributions au risque total calculé, comme rappelé plus haut.

Et ainsi, la démarche ERS produit des éléments d'aide à la décision adaptés à la situation considérée. Par exemple, dans le contexte des ICPE, il peut s'agir d'éléments de réponses à certaines questions que se posent couramment les inspecteurs DREAL et DDPP. Par exemple : que faire pour assurer une absence de risque préoccupant pour les riverains ? Quelles sont les sources, les substances et les voies d'exposition qui sont les principales contributrices au risque total ? Quelles sont les zones où les populations sont exposées aux risques les plus élevés ? De plus, l'objectif de transparence et le traitement des incertitudes rappelés plus haut permettent à un inspecteur DREAL ou DDPP de discuter les choix et les hypothèses retenues dans une étude sanitaire, puis :

- soit de les faire siennes avant de prendre sa décision ;
- soit de demander des compléments d'études. Par exemple : acquisition de données supplémentaires, choix d'autres hypothèses, etc.

À défaut de fournir des certitudes scientifiques là où il n'en existe pas, la démarche ERS permet d'introduire une certaine cohérence dans les processus décisionnels en matière de gestion des risques. De plus, elle correspond à un type de gestion visant l'atteinte d'objectifs prédéterminés, et non visant une obligation de moyens en termes de conformités juridique ou technique [75]. Et ainsi, elle constitue un outil pour répondre à une des principales critiques de l'IGAS envers le PNSE 3 : « *seule une fraction très minoritaire (5 %) des actions* » du plan sont des « *actions fixant une obligation de résultat en termes de diminution des risques* », c'est-à-dire « *des objectifs de résultat en termes d'impact sur le réel* » [73].

Autres éléments de réponse qui me paraissent intéressants

Pour l'élaboration de politiques publiques visant des environnements favorisant la santé, la démarche ERS peut contribuer à éclairer les décideurs en fournissant d'autres types d'apports ; ces apports peuvent être en lien avec les apports présentés dans la section précédente, mais ils sont moins directement illustrés par les études de cas analysées dans la partie 2. J'ai donc souhaité les présenter dans la présente section.

Une manière concrète, proportionnée et scientifique de contribuer à appliquer le principe de précaution

La manière de décliner concrètement le principe de précaution a fait l'objet de nombreux débats en France. C'est notamment le cas depuis la loi constitutionnelle 2005-205 relative à la Charte de l'environnement, promulguée le 1er mars 2005, qui a conféré une valeur constitutionnelle au principe de précaution [296]. D'après le HCSP [124], « *même si ce texte ne vise explicitement que des dommages graves et irréversibles à l'environnement, il a été appliqué par extension aux effets adverses de facteurs environnementaux physiques, chimiques et biologiques pouvant affecter la santé des populations alors que les connaissances acquises sont encore incertaines. […] Ainsi par sa position constitutionnelle le principe de précaution s'impose aux décideurs* » [297].

Le principe de précaution est-il un principe justifiant l'inaction au moindre doute ? Est-il un principe anti-innovation ? Anti-progrès ? Anti-science ? Privilégiant les émotions à la raison ? Son énoncé explicite la première étape attendue pour sa mise en application : une évaluation de risque. En effet, l'article 5 de la Charte de l'environnement indique : « *lorsque la réalisation d'un dommage, bien qu'incertaine en l'état des connaissances scientifiques, pourrait affecter de manière grave et irréversible l'environnement, les autorités publiques veillent, par application du principe de précaution et dans leurs domaines d'attribution, à la mise en œuvre de procédures d'évaluation des risques et à l'adoption de mesures provisoires et proportionnées afin de parer à la réalisation du dommage* » [1].

En complément, la Communication de la Commission européenne du 2 février 2000 sur le principe de précaution [298] fournit une base théorique à l'application de ce principe dans l'Union européenne, qui repose sur trois étapes [114] :

1. une évaluation scientifique doit être menée, aussi complète que possible, explicitant les incertitudes en présence ;
2. les gestionnaires des risques évaluent l'ensemble des mesures de gestion possibles, y compris l'absence d'action ;
3. l'ensemble des parties prenantes intéressées participent au processus de décision.

Ces différentes étapes font directement écho aux apports discutés dans les sections précédentes : transparence apportée par l'ERS, traitement des incertitudes, évaluations de différentes hypothèses, appui aux échanges entre parties prenantes, etc. En d'autres termes, la démarche ERS est un outil utile pour appliquer concrètement le principe de précaution, afin de se fonder sur une gestion rationnelle du risque et de développer des mesures proportionnées à partir de la meilleure science disponible. Plutôt que de s'opposer à l'évaluation des risques, le principe de précaution s'appuie généralement sur elle ; mieux, l'évaluation est consubstantielle au principe de précaution [299]. L'ERS fournit donc un autre apport d'intérêt pour les décideurs qui veulent s'appuyer sur le principe de précaution dans l'élaboration de

politiques publiques : dans un contexte riche en débats, l'ERS constitue une application du principe de précaution qui est concrète, proportionnée, scientifique, et qui vise un objectif de transparence.

Mise en cohérence des savoirs existants

J'ai souhaité ici développer un peu plus un apport qui a juste été mentionné dans les sections précédentes, et qui est résumé ainsi par le HCSP : « *L'ERS consiste à organiser et exploiter les connaissances scientifiques disponibles afin de caractériser les risques encourus par une population* » [294]. En d'autres termes, au travers de ses quatre étapes successives (section 2.A.3) et du schéma conceptuel d'exposition, l'ERS permet de rassembler et de mettre en cohérence les connaissances disponibles dans l'objectif de contribuer à la caractérisation des risques. Ces connaissances sont issues de différents champs disciplinaires, tels que la toxicologie, la modélisation de dispersion atmosphérique, la mesure à l'émission, la mesure dans les milieux environnementaux, la biochimie, la modélisation multimédia, etc. En ce sens, l'Institut de veille sanitaire (InVS) (aujourd'hui intégré à Santé publique France (SpF)) parle de l'ERS comme d'un « *concept fournissant une base permettant aux différentes disciplines scientifiques de dialoguer entre elles* » [157]. L'évaluateur rassemble ces savoirs, puis les capitalise en les structurant au sein d'un raisonnement logique visant à caractériser les risques en présence. Ce raisonnement suit la progression du schéma sources-vecteurs-cibles en justifiant, à chaque étape de l'évaluation, les choix et les hypothèses retenus.

Compte tenu que les données disponibles sont souvent limitées, cette caractérisation des risques n'a pas la prétention de décrire précisément la réalité. Son objectif est d'appuyer au mieux la prise de décision, au regard des connaissances disponibles. En ce sens, dans le contexte des sites et sols pollués, le guide EDR indique : « *L'évaluation des risques n'est pas une activité de recherche mais elle doit s'appuyer sur les connaissances scientifiques et les données propres au site* » [156] : l'évaluateur fournit une estimation imparfaite des risques, sur la base du savoir disponible, dans un contexte particulier, compte tenu des quatre principes généraux de la démarche. Ainsi, une des valeurs de l'ERS est l'alternative qu'elle constitue au « dire d'expert » ou aux décisions non justifiées, en proposant une méthode systématique qui organise les données disponibles, qui indique les hypothèses retenues en l'absence de données et qui discute des incertitudes associées.

Lorsque suffisamment de données sont disponibles pour caractériser la variabilité d'un paramètre, il est possible de considérer dans l'ERS une distribution de probabilité au lieu d'une valeur déterministe. Néanmoins, dans le contexte de la gestion des émissions des ICPE, le retour d'expérience des experts de l'Ineris est que les approches probabilistes s'appliquent généralement assez mal à la faible disponibilité de données qui caractérise la plupart des ERS : pour envisager de définir une distribution de probabilité, il faudrait rassembler suffisamment de données ayant des contextes comparables ; une trentaine de valeurs est un ordre de grandeur souvent cité, mais en pratique des évaluateurs peuvent envisager cette possibilité à partir d'une dizaine de valeurs, si la distribution obtenue semble fiable à leur avis d'expert. Le choix du type de distribution de probabilités - pour l'extrapolation à partir des données collectées - se fait assez souvent aussi sur avis d'expert, ce qui peut biaiser les résultats de l'ERS en y injectant implicitement de la connaissance là où on n'en a pas [300].

L'approche dite « possibiliste » [195, 196] est une alternative qui s'adapte mieux à la relative pauvreté d'informations et permet d'intégrer un avis d'expert de manière explicite. À défaut de

distribution de probabilités, cette approche peut considérer un minimum, un maximum et un intervalle correspondant aux valeurs les plus vraisemblables, voire plusieurs intervalles avec des niveaux de confiance différents. Et ainsi, l'approche possibiliste peut à la fois caractériser la variabilité d'un paramètre (comme une distribution de probabilité basée sur suffisamment de données disponibles), mais également les incertitudes associées. Au final, cette approche permet d'avoir des intervalles de variations moins grands (parfois il peut y avoir plusieurs ordres de grandeur entre le minimum et le maximum dans la littérature scientifique) et d'injecter moins d'avis d'experts - un avis sur quelques niveaux de confiance dans l'approche possibiliste, par rapport à un avis sur une probabilité extrapolée pour chaque valeur possible, dans l'approche probabiliste) et d'une manière plus explicite (la distribution de probabilité peut donner une fausse impression de savoir précis).

Outil intégratif pour l'étude de l'exposome

Le concept d'exposome a été proposé afin de considérer l'ensemble des expositions environnementales d'un individu au cours de sa vie. L'exposome vise notamment à dépasser la logique des études et des réglementations mises en œuvre substance par substance, ou source par source, ou encore voie d'exposition par voie d'exposition.

En 2017, en France, la loi de modernisation du système de santé [301] a permis de faire entrer le concept d'exposome dans le Code de la santé publique (article L. 1411-1). Ce concept est entré dans le champ des PNSE avec le PNSE 3 (2015-2019) [2]. Ce plan appelle à « *un changement de paradigme* », dans le sens où il s'agit « *de prendre en considération toutes les sources de pollution ou d'exposition susceptibles de concourir à l'altération de la santé des individus, à la fois en considérant la totalité des voies d'exposition à un polluant ou une nuisance et, quand c'est possible, leurs interactions entre polluants* ». Dans ce contexte, la démarche ERS constitue également un outil utile, puisqu'elle peut intégrer toutes les substances, toutes les sources et toutes les voies d'exposition en présence. Par exemple, dans le cadre de la gestion des émissions des ICPE, le champ des ERS inclut l'ensemble des substances émises par l'ensemble des sources du site étudié ; puis les risques des riverains sont caractérisés pour les voies d'exposition par inhalation, par ingestion et (plus rarement) par contact cutané. Les indicateurs de risques calculés sont ensuite sommés, et les sommes multi-sources et multi-voies sont comparées aux valeurs repères usuelles (QD = 1 ; ERI = 10^{-5}) [52]. Dans certains cas, lorsque les données disponibles le permettent, il est également possible d'effectuer une somme au niveau des expositions, après avoir convertit les doses externes (les quantités de substances rentrant en contact avec le corps humain) en doses internes.

En complément, comme indiqué précédemment :

- les pratiques classiques des évaluateurs consistent également à sommer les indicateurs de risque calculés pour chaque substance (ou pour chaque substance ayant le même organe cible), puis à comparer ces sommes multi-substances aux valeurs repères usuelles [52] ;
- les scénarios d'exposition considérés portent classiquement sur plusieurs dizaines d'années et sur plusieurs lieux fréquentés par l'individu considéré.

Au global, la démarche ERS est un outil intégratif à large spectre, qui peut s'avérer utile dans l'étude de l'exposome (et en particulier de l'exposome chimique), et plus généralement, en appui à des logiques de gestion tenant compte des expositions cumulées, dans le temps et dans l'espace. Néanmoins, comme pour les effets des mélanges, l'utilité de l'ERS sera limitée

par la complexité des phénomènes considérés et par la grande variabilité des situations individuelles : il existe une infinité d'exposomes potentiels et chaque individu se caractérise par son propre exposome. Si la prise en compte de première approche que permet l'ERS est bien plus utile que de ne pas tenir compte du tout de la notion d'exposome (comme dans certaines réglementations sectorielles par exemple), appréhender l'exposome dans son ensemble présente des défis majeurs, en l'état des connaissances et des techniques actuelles [302]. Par exemple : les limites actuelles de détection et de quantification métrologiques ne permettent pas de mesurer toutes les substances en présence ; si la source considérée peut être étudiée avec une approche multi-substances et multi-voies d'exposition, ainsi que sur une période de plusieurs dizaines d'années, l'exercice se complexifie encore plus en considérant les valeurs de fond des différents milieux d'exposition, intégrant l'influence des autres sources de polluants et intégrant des lieux d'exposition qui ne sont pas sous l'influence de la source considérée. Par conséquent, en pratique, plutôt que de tenter d'appréhender l'exposome dans sa totalité, il s'agit souvent de considérer l'exposome le plus large qu'il est raisonnablement possible d'appréhender dans le contexte particulier de l'étude.

Construction, justification et suivi de politiques publiques telles que le PNSE

Dans son évaluation des trois premiers PNSE, le HCSP fait plusieurs recommandations pour l'élaboration des futurs plans de ce type : « *Le processus de sélection et de priorisation des actions retenues doit être explicite, argumenté et rendu transparent. Les critères de priorisation […] doivent être exposés dans le cadre de la méthode retenue.*

Les politiques publiques en santé-environnement sont peu évaluables et difficilement évaluées. Des objectifs exprimés en termes d'indicateurs d'impacts sur les milieux ainsi que sanitaires, doivent être associés aux actions afin de pouvoir déterminer concrètement la diminution des facteurs de risque en santé-environnement » [124]. Dans cette logique, un article du journal Le Monde a pu employer la formule marquante que le PNSE 3 a eu « *très peu d'impact sanitaire positif mesurable* » [127] ; ceci fait écho à l'analyse du CGEDD, qui souligne « *le très faible nombre d'actions visant à diminuer un risque et la quasi absence de toute quantification afférente* » [123].

Dans ce contexte, la démarche ERS peut être utilisée pour contribuer à répondre à ces critiques et recommandations. Par exemple :

- sa capacité à hiérarchiser plusieurs options de gestion, en fonction des indicateurs de risques associés, permet d'obtenir un « *processus de sélection et de priorisation des actions retenues* » qui est « *explicite, argumenté et […] transparent* » ; cette capacité à hiérarchiser contribue aussi à gérer au mieux « *les faibles moyens humains et financiers dévolus aux politiques de santé-environnement* » [119] ;
- les indicateurs de risque de l'ERS peuvent être utilisés pour exprimer des objectifs et, dans ce cas, ils peuvent également servir « *d'indicateurs d'impacts […] sanitaires* », permettant de « *déterminer concrètement la diminution des facteurs de risque en santé-environnement* » [124].

Par exemple, la démarche ERS a été utilisée par l'Anses pour estimer le risque collectif associé à plusieurs polluants d'intérêt pour la qualité de l'air intérieur [71, 72]. Le même exercice pourrait être fait plusieurs années plus tard (par exemple avec les données de la deuxième campagne nationale logements (CNL2) [303]) afin d'évaluer l'impact des politiques publiques d'amélioration de la qualité de l'air intérieur. Un objectif d'une baisse de nombre de cas attribuables pourrait également être fixé par les pouvoirs publics, au global ou pour certaines maladies jugées prioritaires.

La réalisation d'une ERS avant et après la mise en œuvre d'une mesure de gestion, de manière à évaluer l'ampleur de son impact positif, n'est pas une pratique courante des pouvoirs publics à ce stade : le HCSP indique qu'« *une fois une évaluation du risque réalisée, une mesure de gestion est souvent prise, parfois après un délai substantiel, et il est alors considéré qu'il n'y a plus d'urgence à réaliser une nouvelle évaluation, faute d'une culture ancrée d'évaluation ex-post de l'impact des mesures adoptées* » [9].

Le type d'indicateurs fournis par la démarche ERS permettrait également de pouvoir contribuer à justifier - de manière argumentée, transparente et donc discutable par les parties prenantes impliquées - le choix des actions retenues au sein du champ des possibles et dans un contexte budgétaire limité. Ceci fait écho aux apports de l'ERS en termes de hiérarchisation des enjeux, d'objectif de transparence et d'appui aux échanges avec les parties prenantes, décrits dans des sections précédentes. En ce sens, la démarche ERS peut contribuer à satisfaire la recommandation des inspections générales invitant à élaborer un PNSE « *stratégique, recentré et simplifié* » qui ne soit pas « *un nouveau catalogue d'actions* » [123].

Il s'agit notamment d'éviter l'écueil de retenir toutes les actions proposées pour tenter de satisfaire toutes les parties prenantes. En ce sens, les inspecteurs de l'IGEDD indiquent : « *Les agents des ministères nous l'ont dit au cours de nos discussions, en nous expliquant que lors du dispositif "grenellien" où l'ensemble des acteurs étaient réunis, toutes les propositions ont été acceptées et traduites en actions, "pour faire plaisir". Il n'y avait aucune perversité dans le processus, il s'agissait de satisfaire les exigences des parties prenantes, sans être capables, pour autant, de mobiliser les moyens afférents. Ces parties prenantes ont toutefois été quelque peu trompées, puisqu'elles croyaient que leurs propositions allaient se concrétiser* » [126]. La rapporteure de la Commission d'enquête parlementaire de 2020, elle, commente ainsi : « *Ces effets d'annonce, s'ils ne s'accompagnent pas de progrès mesurables, finissent par user la confiance de la population, sans laquelle il est impossible de gérer le risque* » [126].

Toutefois, si l'ERS peut fournir une méthode et des indicateurs associés, le suivi effectif d'un plan demande de pouvoir s'appuyer sur la production de données permettant de renseigner ces indicateurs. Par exemple, si une amélioration de l'impact sanitaire lié à la qualité de l'air intérieur pourrait être quantifiée, c'est notamment parce que deux campagnes nationales ont été effectuées avec plusieurs années d'intervalle : ces campagnes fournissent notamment des données de concentrations dans l'air qui permettent d'évaluer les expositions et les risques correspondants, et ainsi de caractériser l'évolution de la situation sanitaire liée à la qualité de l'air intérieur dans les logements français [303, 304]. Cette utilité des données permettant d'évaluer des risques ouvre sur les enjeux liés à la production de ces données, à leur accessibilité et à leur interopérabilité [2, 305]. Sur ce sujet, le HCSP souligne *« la difficulté à collecter ces données en l'absence de plateformes les regroupant* » [124], notamment parce que ces données ont été « *historiquement collectées et produites pour des utilisations différentes de celles de la recherche ou l'expertise en santé-environnement* » [109]. Aussi, le

projet d'« espace commun de données environnementales pour la santé » (Green Data for Health (GD4H)) [306] vise à contribuer à répondre à cette difficulté. Comme le souligne l'IGAS, l'objectif est que « *les pilotes des actions, identifiés dans le [PNSE]* » puissent « *justifier éventuellement des moyens mis en œuvre, mais principalement de leur efficacité en termes de réduction de l'exposition aux risques* » [73].

Acceptabilité

Avec les substances présentant des effets sans seuil, quelle que soit la dose d'exposition, un individu exposé présentera toujours un excès de risque par rapport à un individu non exposé. Se pose alors la question délicate du niveau d'excès de risque acceptable.

La valeur repère « ERI = 10^{-5} » est utilisé comme « critère d'acceptabilité » dans le contexte des ICPE [162]. Historiquement, cette valeur a été notamment retenue par l'OMS en 1993 pour fixer des valeurs limites dans l'eau potable [307]. D'après le HCSP [294], « *les critères ayant permis de fixer ce seuil de 10^{-5} ne sont pas toujours bien connus. Il est généralement fait référence aux travaux de Mantel et Bryan [308] ou de Kelly et Cardon [309]* ». Et si elle est parfois considérée comme une valeur d'acceptabilité sociétale du risque[27], elle n'a jamais fait l'objet, à ma connaissance - et à celle des nombreux experts que j'ai interrogés sur le sujet - d'une phase de discussion et de débat officiel avec des représentants de la société en France.

D'autres valeurs de risque jugé « acceptable » peuvent être trouvées dans d'autres contextes, soulignant l'existence d'une grande variabilité dans la déclinaison concrète de la notion d'acceptabilité des (excès de) risques. Par exemple :

- D'après l'Anses, « *pour les rayonnements ionisants et pour le radon dans l'air, une exposition pendant 70 ans à la valeur limite réglementaire pour l'exposition du public correspondrait à un niveau estimé de risque de cancer de l'ordre de 10^{-3}-10^{-2}, d'après les relations exposition-risque disponibles (Hunter et al. 2015 ; ICRP 2022) et sous l'hypothèse d'une relation linéaire sans seuil entre exposition et risque* » [310].
  Dans ce contexte des rayonnements ionisants et du radon dans l'air, le risque jugé implicitement acceptable par les pouvoirs publics - via la réglementation - est donc bien supérieur (de plusieurs ordres de grandeur) à la valeur repère usuelle de 10^{-5} ;
- Dans le cadre de la gestion des SSP, la circulaire 10 Décembre 1999 indiquait : « *Si les techniques disponibles ne permettent pas de façon réaliste d'atteindre le niveau de 10^{-5}, un niveau supérieur peut être retenu, sans toutefois dépasser 10^{-4}, sur présentation d'une étude technico-économique détaillée* » [311].
  Cet exemple montre que, en matière de gestion des risques, la notion d'acceptabilité peut s'appuyer sur des critères de différentes natures, incluant des critères qui se trouvent en dehors du champ de l'évaluation des risques.
- « *L'Union européenne a publié en juin 1996 une directive relative à la protection contre les rayonnements ionisants. Fondées sur les travaux de l'International Commission on*

[27] En France, le HCSP retient une valeur de 10^{-5} mais d'autres auteurs et organismes (par exemple : l'US-EPA) peuvent préférer une valeur de 10^{-6}. L'Anses, elle, dans son positionnement d'évaluation des risques, ne fait pas de choix et propose des valeurs guides sanitaires (par exemple, des valeurs guides de qualité d'air intérieur (VGAI)) à la fois pour 10^{-5} et 10^{-6} ; le HCSP, lui, dans son positionnement d'appui à la gestion des risques, a fait le choix du 10^{-5} et élabore des Valeurs repères d'aide à la gestion de la qualité de l'air intérieur (VRAI) sur la base des VGAI correspondant à 10^{-5}.

Radiological Protection (ICRP), les valeurs limites d'exposition sont de 1 mSv/an pour la population générale et de 20 mSv/an pour les travailleurs de l'industrie nucléaire ; ces doses représentent des ERI de décès par cancer radio-induit de l'ordre de 1 pour 10 000 pour le public et de 1 ‰ pour les professionnels » [75].
Cet exemple montre que la déclinaison de la notion d'acceptabilité peut dépendre du type de populations exposées, et en particulier des sensibilités susceptibles de s'y trouver. Ici, les travailleurs sont supposés ne pas être des enfants, ne pas être des personnes âgées, ne pas être des personnes souffrant de maladies sévères, etc.

- Aux Pays-Bas, pour le « risque sociétal acceptable » lié à l'urbanisation ou aux industries dangereuses [299, 312] :
    - en deçà de 10 vies menacées (par an) sur 10 000 000, le risque est « admissible » ;
    - au-delà et jusqu'à 10 vies menacées sur 10 000, il doit être « réduit » ;
    - lorsque plus de 10 vies sur 10 000 sont en jeu, le risque est « inacceptable ».

  Cet exemple illustre que l'acceptabilité des risques peut conduire à l'établissement de plusieurs valeurs de référence, traduisant une gradation possible dans la déclinaison concrète de cette notion, plutôt que de retenir une unique valeur « couperet » séparant l'acceptable de l'inacceptable. Cet exemple suggère que la notion d'acceptabilité peut conduire à considérer plusieurs intervalles de gestion, comme l'a aussi proposé le HCSP [294] dans le cadre des études de zone (évaluations de risques sanitaires à l'échelle d'une zone géographique plutôt qu'à l'échelle d'un site industriel), bien que cette proposition n'ait pas été retenue dans le Guide pour la conduite d'une étude de zone [293].

- « *Pour les particules de l'air ambiant, les concentrations en $PM_{2,5}$ les plus faibles observées en France sont associées à un niveau de risque de l'ordre de 10^{-4} pour le cancer du poumon, le petit poids de naissance et l'asthme, et de l'ordre de 10^{-3} pour les décès anticipés, par rapport à une concentration de fond de 5 $\mu g.m^{-3}$* » [310].
  Le critère d'acceptabilité actuel (ERI = 10^{-5}) conduirait à n'autoriser presque plus aucune nouvelle ICPE en France ; ceci paraît, d'une manière générale, déraisonnable au regard de nombreux critères, et en particulier au regard du critère sanitaire, puisque n'autoriser aucune nouvelle ICPE serait probablement associé à de forts impacts sanitaires. Le critère d'acceptabilité actuel a donc besoin d'être reconsidéré, ce qui pourrait être l'occasion d'organiser une phase de discussion et de débat formalisée, avec des représentants de la société.

Cette grande variété de valeurs de référence existantes, issues de différents contextes en lien avec la santé environnementale, montre que la question de l'acceptabilité des risques est une question complexe à gérer. En particulier, il s'agit d'un sujet que je souhaiterais approfondir par la suite avec de futurs travaux, comme développé à la section C ci-dessous ; j'y présente également mes premières réflexions sur ce sujet délicat, à ce stade.

D'après William Dab, ancien DGS, « *l'idée qu'il puisse exister un seuil universel de risque accepté socialement est vouée à l'échec. Car, en réalité, ce qui est acceptable ou non n'est pas tant le niveau de risque que le processus décisionnel aboutissant au choix d'une option de gestion du risque. C'est en ce sens qu'on peut dire que la quantification est un prérequis de l'acceptation. De ce point de vue, le résultat de l'évaluation des risques compte tout autant que la transparence de son processus de gestion »* [75]. Si la notion d'acceptabilité ne peut se

réduire à une valeur *a priori*, alors le processus permettant de déterminer des règles d'acceptabilité pourrait effectivement être un élément essentiel de la réflexion. Celle-ci aurait alors besoin de porter également sur comment protéger ce processus des influences inappropriées (cf. travaux présentés à la section 2.F, par exemple), afin de réduire le risque de permettre des abus.

Avec son objectif de transparence, ses aides à l'échange entre parties prenantes et son traitement des incertitudes, la démarche ERS peut fournir un cadre partagé pour une discussion éclairée sur l'acceptabilité des risques considérés. En outre, les quantifications de risques qu'elle produit, dans un contexte où il n'existe pas de critère d'acceptabilité universel, incitent les décideurs à expliciter l'ensemble de leur critère de décision, pour que la logique sous-jacente puisse faire l'objet d'avis des parties prenantes impliquées et être débattue publiquement. Comme le souligne Christine Noiville, spécialiste de la gouvernance des risques environnementaux et sanitaires, « *un risque n'est pas en soi acceptable, il le devient par le prisme du débat, qui lui donne sa légitimité* » [299]. En ce sens, la démarche ERS participe à la démocratie sanitaire, éclairée par les connaissances scientifiques disponibles.

A.2. À titre personnel : développement de compétences de chercheurs

« *Se défier du ton d'assurance, qu'il est si facile de prendre et si dangereux d'écouter.* »

Charles Coquebert

Cette section vise à rassembler et synthétiser les compétences types associées aux diplômés du doctorat (Tableau 6) que j'ai eu l'occasion de développer et de renforcer à l'occasion des travaux présentés dans la partie 2. Pour éviter des redites inutiles, cette synthèse est présentée sous forme tabulaire, au regard du référentiel de l'arrêté du 22 février 2019 [8], incluant des renvois vers les sections correspondantes dans les études de cas présentées à la partie 2.

La recherche et l'expertise sont deux activités qui peuvent être distinguées l'une de l'autre par leur objet respectif : accroître les connaissances disponibles, d'un côté, et répondre à des questions de décideurs sur la base des connaissances disponibles, de l'autre côté [288, 313-315]. Néanmoins, au global, il me semble que ces deux démarches partagent aussi de nombreux points communs. Par exemple :

- viser à apporter des éléments de réponse à une problématique, souvent formulée par une question ;
- réaliser un bilan de l'état des connaissances et l'analyser avec un regard critique ;
- produire de nouvelles connaissances.
  Pour l'expertise, cette production peut parfois se réduire à l'assemblage et la mise en cohérence de données existantes, l'objet structuré produit me semblant être une nouvelle connaissance en elle-même, avec une signification et une valeur ajoutée qui n'existaient pas avec les données éparses initiales ;
- mettre les connaissances produites en regard des lacunes qui restent à combler dans le domaine étudié ;
- partager les connaissances produites avec les personnes à qui elles peuvent être utiles ;
- soumettre les travaux réalisés à des échanges critiques avec les différents acteurs du domaine dans lequel s'inscrit la problématique.

En ce sens, l'exercice régulier de l'expertise m'a aussi permis, je le crois, de développer et de renforcer certaines compétences types associées aux chercheurs.

Tableau 6 : Développement et renforcement des compétences communes aux docteurs

Bloc de compétences - Arrêté du 22 février 2019 [8]	**Compétences communes aux docteurs**	**Exemples de travaux ayant permis de développer ces compétences**
Bloc 1 : Conception et élaboration d'une démarche de recherche et développement, d'études et prospective	Disposer d'une expertise scientifique tant générale que spécifique d'un domaine de recherche et de travail déterminé.	• Émissions des ICPE (section 2.D.2)
	Faire le point sur l'état et les limites des savoirs au sein d'un secteur d'activité déterminé, aux échelles locale, nationale et internationale.	• Qualité de l'air intérieur (section 2.C.2) • Usage de renaturation (section 2.E.2) • Gestion des liens d'intérêt (section 2.F.2)
	Identifier et résoudre des problèmes complexes et nouveaux impliquant une pluralité de domaines, en mobilisant les connaissances et les savoir-faire les plus avancés.	• Hiérarchisation de substances (section 2.B.2) • Usage de renaturation (section 2.E.2)
	Identifier les possibilités de ruptures conceptuelles et concevoir des axes d'innovation pour un secteur professionnel.	• Usage de renaturation (section 2.E.2)
	Apporter des contributions novatrices dans le cadre d'échanges de haut niveau, et dans des contextes internationaux.	-
	S'adapter en permanence aux nécessités de recherche et d'innovation au sein d'un secteur professionnel.	-
Bloc 2 : Mise en œuvre d'une	Mettre en œuvre les principes, outils et démarches d'évaluation des coûts et de financement d'une démarche d'innovation ou de R & D.	• Qualité de l'air intérieur (section 2.C.2)

Bloc de compétences - Arrêté du 22 février 2019 [8]	Compétences communes aux docteurs	Exemples de travaux ayant permis de développer ces compétences
démarche de recherche et développement, d'études et prospective-mettre en œuvre les méthodes et les outils de la recherche en lien avec l'innovation	Garantir la validité des travaux ainsi que leur déontologie et leur confidentialité en mettant en œuvre les dispositifs de contrôle adaptés.	• Gestion des liens d'intérêt (section 2.F.2)
	Gérer les contraintes temporelles des activités d'études, d'innovation ou de R & D.	• Hiérarchisation de substances (section 2.B.2)
	Mettre en œuvre les facteurs d'engagement, de gestion des risques et d'autonomie nécessaire à la finalisation d'un projet R & D, d'études ou d'innovation.	-
Bloc 3 : Valorisation et transfert des résultats d'une démarche R&D, d'études et prospective	Mettre en œuvre les problématiques de transfert à des fins d'exploitation et valorisation des résultats ou des produits dans des secteurs économiques ou sociaux.	-
	Respecter les règles de propriété intellectuelle ou industrielle liées à un secteur.	-
	Respecter les principes de déontologie et d'éthique en relation avec l'intégrité des travaux et les impacts potentiels.	• Émissions des ICPE (section 2.D.2)
	Mettre en œuvre l'ensemble des dispositifs de publication à l'échelle internationale permettant de valoriser les savoirs et connaissances nouvelles.	• Qualité de l'air intérieur (section 2.C.2) • Gestion des liens d'intérêt (section 2.F.2)
	Mobiliser les techniques de communication de données en " open data " pour valoriser des démarches et résultats.	• Hiérarchisation de substances (section 2.B.2) • Gestion des liens d'intérêt (section 2.F.2)
Bloc 4 : Veille scientifique et technologique à l'échelle internationale	Acquérir, synthétiser et analyser les données et informations scientifiques et technologiques d'avant-garde à l'échelle internationale.	• Usage de renaturation (section 2.E.2) • Gestion des liens d'intérêt (section 2.F.2)
	Disposer d'une compréhension, d'un recul et d'un regard critique sur l'ensemble des informations de pointe disponibles.	• Émissions des ICPE (section 2.D.2) • Usage de renaturation (section 2.E.2)

Bloc de compétences - Arrêté du 22 février 2019 [8]	Compétences communes aux docteurs	Exemples de travaux ayant permis de développer ces compétences
	Dépasser les frontières des données et du savoir disponibles par croisement avec différents champs de la connaissance ou autres secteurs professionnels.	• Hiérarchisation de substances (section 2.B.2)
	Développer des réseaux de coopération scientifiques et professionnels à l'échelle internationale.	• Qualité de l'air intérieur (section 2.C.2)
	Disposer de la curiosité, de l'adaptabilité et de l'ouverture nécessaire pour se former et entretenir une culture générale et internationale de haut niveau.	• Émissions des ICPE (section 2.D.2) • Gestion des liens d'intérêt (section 2.F.2)
Bloc 5 : Formation et diffusion de la culture scientifique et technique	Rendre compte et communiquer en plusieurs langues des travaux à caractère scientifique et technologique en direction de publics ou publications différents, à l'écrit comme à l'oral.	• Qualité de l'air intérieur (section 2.C.2) • Usage de renaturation (section 2.E.2) • Gestion des liens d'intérêt (section 2.F.2)
	Enseigner et former des publics diversifiés à des concepts, outils et méthodes avancés.	• Hiérarchisation de substances (section 2.B.2) • Qualité de l'air intérieur (section 2.C.2) • Émissions des ICPE (section 2.D.2)
	S'adapter à un public varié pour communiquer et promouvoir des concepts et démarches d'avant-garde.	• Émissions des ICPE (section 2.D.2)
Bloc 6 : Encadrement d'équipes dédiées à des activités de recherche et développement, d'études et prospective	Animer et coordonner une équipe dans le cadre de tâches complexes ou interdisciplinaires.	• Hiérarchisation de substances (section 2.B.2) • Qualité de l'air intérieur (section 2.C.2) • Émissions des ICPE (section 2.D.2)
	Repérer les compétences manquantes au sein d'une équipe et participer au recrutement ou à la sollicitation de prestataires.	• Qualité de l'air intérieur (section 2.C.2) • Émissions des ICPE (section 2.D.2)
	Construire les démarches nécessaires pour impulser l'esprit d'entrepreneuriat au sein d'une équipe.	-
	Identifier les ressources clés pour une équipe et préparer les évolutions en termes de formation et de développement personnel.	-
	Évaluer le travail des personnes et de l'équipe vis à vis des projets et objectifs.	• Qualité de l'air intérieur (section 2.C.2) • Émissions des ICPE (section 2.D.2)

Le Guide du Doctorat, élaboré en 2018 par l'Association nationale des docteurs (ANDès) et la Confédération des jeunes chercheurs, propose également une liste de « *compétences développées pendant le doctorat* » [316]. Le développement de certaines d'entre elles me semble principalement évaluables par le Directeur de thèse - au regard de son observation du travail au cours du déroulement des activités de recherche - et plus difficiles à faire apprécier sur la base d'éléments pouvant être présentés dans le manuscrit d'une démarche de VAE. Par exemple : « *capacité à accepter la critique, à faire preuve d'humilité, de doute scientifique et d'éthique* », être capable « *de travailler en équipe […] en faisant preuve de respect, d'écoute, de confiance, d'ouverture à la diversité* », ou encore être capable « *de gérer son temps et entretenir son enthousiasme quels que soient les aléas appréhendés* ». Néanmoins, au regard des travaux présentés dans les sections précédentes, certaines autres compétences me semblent pouvoir être considérées comme ayant été développées ou renforcées, telles que celles présentées ci-dessous.

Conception d'un projet de recherche

Être capable :

- « *de conceptualiser, transposer un phénomène ou une situation complexe en sujet de recherche et le problématiser* », notamment avec la première étape de formulation de la problématique des différents exercices de hiérarchisation possibles [292] ;
- « *de participer à la recherche de moyens financiers dédiés au projet de recherche* », le pilotage du programme d'appui DRC30 au ministère chargé de l'Écologie incluant des co-financements de projets de recherche, en complément des financements obtenus par des appels à projets de recherche (ex : programmes PRIMEQUAL et CORTEA) ;
- « *d'élaborer un projet de recherche s'intégrant dans les préoccupations de la structure, vis-à-vis du contexte national et international, et susceptible de présenter une valeur ajoutée en termes de connaissances, réalisable compte tenu des moyens négociables et mobilisables (matériels, financiers, humains), d'un temps imparti, de contraintes et incertitudes* », notamment avec les projets de recherche portant sur les émissions dans l'air intérieur issues de produits de consommation (section 2.C.2), qui s'inscrivaient en cohérence avec les missions confiées à l'Ineris par la DGPR dans le cadre du PQAI [33, 34, 36] ;
- « *d'effectuer un état des lieux synthétisant différentes sources au delà de sa discipline, d'identifier les limites de la connaissance, et les pistes d'exploration possibles ainsi que les points controversés méritant de faire l'objet de travaux complémentaires* », ce qui a été réalisé notamment à l'occasion des travaux sur la gestion des liens d'intérêt dans des organismes d'évaluation des risques en Europe (section 2.F.2) ;
- « *de maintenir et développer continuellement ses connaissances et compétences* », comme le montre notamment les différentes formations - par exemple : gestion des SSP, mesures à l'émission, modélisation de dispersion atmosphérique, modélisation multimédia, toxicologie - que j'ai pu suivre en parallèle de mes activités principales à l'Ineris, dans le cadre de la formation continue, en complément des connaissances acquises à l'occasion des revues de littérature scientifique effectuées. Ces connaissances ont pu être concrètement exploitées ou mises en œuvre dans les travaux que j'ai menés, ce qui a directement contribué à les transformer en

compétences. Par ailleurs, la capacité à collecter des connaissances dans la littérature, puis à les synthétiser avec un regard critique, me semble pouvoir être considérée comme une compétence à part entière ;

- « *de développer selon une démarche de recherche une analyse critique de la production scientifique, technologique, sociale ou culturelle dans le domaine considéré* », notamment avec l'exercice de retour d'expérience critique (section 2.D.2) réalisé dans le cadre de la gestion des émissions des ICPE.

Valorisation et transfert des résultats de la recherche

Être capable :

- « *de faire un bilan objectif et critique des avancées de ses propres travaux, d'identifier la valeur ajoutée par rapport aux travaux antérieurs* », ce qui a notamment été formalisé dans la section Discussion des différents articles publiés [41-43, 51, 171] ;
- « *d'effectuer une communication scientifique orale* », ce qui a notamment été fait dans différentes conférences et journées techniques [37-39, 57] ;
- « *de rédiger ou de contribuer à rédiger une publication scientifique en choisissant la revue la mieux adaptée à la nature du sujet, aux résultats obtenus ainsi qu'aux acteurs concernés, en reconnaissant la contribution de chacun* ».
  Notamment, les trois articles rédigés en langue anglaise ont été publiés dans des revues internationales faisant partie du premier quartile d'au moins un domaine directement lié au contenu de l'article. Par exemple, l'article intitulé « Sprays and diffusers as indoor air fresheners: Exposure and health risk assessment based on measurements under realistic indoor conditions » a été publié dans la revue Indoor Air (premier quartile pour les domaines *Building and Construction*, *Environmental Engineering et Public Health*, *Environmental and Occupational Health*).
  De plus, chacun de ces articles a inclus une description des différentes contributions des auteurs, en utilisant le standard CRediT (Contributor Roles Taxonomy) ;
- « *de transférer, vulgariser et valoriser ses résultats de recherche dans le respect de la propriété intellectuelle et d'une éventuelle confidentialité et en s'appuyant sur les services appropriés* », notamment avec l'intégration des résultats de recherche obtenus dans les formations proposées par l'Ineris sur la qualité de l'air intérieur et la gestion des émissions des ICPE [194, 224], en s'appuyant sur Ineris Formation [317] ;
- « *de contribuer au dialogue entre sciences (humaines, techniques et expérimentales, sociales) et société* », notamment avec une rencontre « Ineris - Société civile » portant sur « les enjeux sanitaires liés à l'utilisation de produits de consommation » [189] ;
- « *de communiquer auprès de différents publics y compris non spécialistes* », notamment avec des formations et des interventions auprès de bureaux d'études, d'inspecteurs de l'État, d'agents de collectivités territoriales, de militaires, d'étudiants et de représentants d'associations ;
- « *de conseiller, de former et de transmettre de façon argumentée et accessible à propos des méthodes et techniques propres à son champ de spécialité* », notamment avec la formation en prise de poste et la formation continue des inspecteurs DREAL et DDPP [224].

Compétences techniques et méthodologiques des docteurs

Être capable :

- « *d'enrichir et compléter en permanence, éventuellement de manière autonome, ses connaissances et compétences méthodologiques et techniques* », notamment avec les maîtrises techniques affinées en formation continue et rappelées plus haut, ainsi qu'avec les revues de littérature réalisées sur des sujets dont je n'étais pas expert. Par exemple : usage de renaturation dans la gestion des SSP (section 2.E.2) et gestion des liens d'intérêt (section 2.F.2) ;
- « *de se former et se tenir à jour sur les grands enjeux et défis à venir, l'efficacité des méthodes et techniques, leurs limites, leur transférabilité, etc.* ».
  Au-delà de la formation continue et de l'approfondissement de sujets au moment de la réalisation de nouveaux travaux, il me semble que la diversité des sujets traités et des experts rencontrés dans les instances d'expertise collective auxquelles je participe (Anses, HCSP, OCDE) fournit de nombreuses occasions d'apprendre et de se tenir informés sur les thèmes à forts enjeux attendus pour les années à venir ;
- « *de transférer et d'adapter des méthodes et techniques à un nouveau contexte* », avec notamment la mise en œuvre de méthodes d'évaluation des risques au sein des réflexions pouvant conduire à mener des projets de renaturation sur d'anciens sites industriels (section 2.E.2) ;
- « *de maîtriser tous les aspects de la gestion de projet : en optimisant son temps, en priorisant les tâches dans leur conceptualisation et leur réalisation, en s'appropriant rapidement un environnement complexe, en construisant, formalisant des problématiques, en décomposant des problèmes complexes en questions plus simples, en ordonnant les diverses étapes du projet et en planifiant leur déroulement pas à pas, en développant des connaissances pointues dans son champ disciplinaire, en proposant rapidement des approches, usuelles ou innovantes, pour identifier et résoudre des problèmes complexes ou mal posés, en collectant des données, en développant des méthodes, des techniques d'analyses, de nouveaux modèles, en mettant en œuvre les solutions proposées en respectant et en gérant le budget alloué, en faisant le point sur les moyens disponibles et en suggérant leur évolution, en faisant évoluer un projet pour s'adapter aux changements de contexte, notamment en matière de délais, en établissant un bilan du projet* », autant d'aspects qui ont pu être développés et renforcés au cours de mes multiples missions de responsable de projet, à l'Ineris et aussi auparavant, chez Lyonnaise des eaux et chez ERM (partie 1) ;
- « *de maîtriser sa communication écrite et orale : en adaptant, en reformulant et en structurant avec soin toute communication pour la rendre claire, concise et convaincante en fonction du contexte, en utilisant des outils adaptés, pour différents médias, en mobilisant sa force de conviction dans un contexte de négociation, en interagissant avec des personnes de différents niveaux de qualification, en maîtrisant à l'écrit la syntaxe, la correction typographique, orthographique et grammaticale* », autant d'aspects qui ont pu être développés et renforcés au cours de mes multiples production écrites (rapports, notes de synthèse, articles pour des revues scientifiques), qui ont quasi-systématiquement été suivies ou précédées de présentation orales dans des contextes variés ; par exemple : conférence scientifique, commission de suivi de site (CSS), conférence auprès d'ONG, formation d'inspecteurs de l'État, négociation entre le ministère chargé de l'Écologie et des représentants de fabricants de produits de consommation ;

- « *d'intervenir en tant que formateur, en s'adaptant au public : en encourageant l'implication des participants, en apportant des réponses à leurs interrogations* », autant d'aspects qui ont pu être développés et renforcés au cours de mes plus de dix années d'expérience en tant que formateur, et affinées avec une formation de formateur certifiante ;
- « *de tirer tous les bénéfices d'une compétence interdisciplinaire, notamment en confrontant ses connaissances avec celles disponibles dans des disciplines connexes et en les mettant en synergie* », avec notamment le projet de hiérarchisation de substances préoccupantes, qui a confronté et mis en synergie différentes disciplines au sein d'une analyse multicritère (section 2.B.2).

Compétences générales des docteurs

Être capable :

- « *de coordonner une équipe (stagiaires, éventuellement collègues qui participent aux travaux du projet doctoral) et piloter un projet (le doctorat dans son ensemble, la rédaction d'une publication, etc.)* », avec notamment le pilotage de projets s'appuyant sur des équipes pluridisciplinaires. Par exemple, les projets de recherche ou les WP que j'ai eu l'occasion de piloter ont inclus le travail de plusieurs ingénieurs-chercheurs (modélisateur, spécialiste de la mesure à l'émission ou dans l'air ambiant, analyste de laboratoire…) et techniciens ;
- « *de s'adapter : à son contexte professionnel, aux personnes, à leurs méthodes de travail et à leurs besoins ou demandes, à un cadre international et multiculturel, aux rythmes imposés par l'environnement professionnel, aux évolutions des méthodes et outils de travail* ».
  J'ai pu travailler dans différentes structures (« grand groupe », cabinet de conseil, EPIC, comités d'expert, comités de normalisation) et dans différents domaines ; par exemple : service public de la production et de la distribution d'eau potable ; gestion de l'eau en entreprise ; études d'impact environnemental réglementaires en France ; études d'impact environnemental et social (EIES) pour des projets de développement à l'international ; études sanitaires d'ICPE ; études sanitaires liés aux émissions des produits de consommation courante, notamment au sein de comités de normalisation européens ; usage de renaturation dans la gestion des SSP ; gestion des liens d'intérêt dans des organismes européens d'évaluation des risques. Ces expériences correspondent à une adaptation à une variété de contextes professionnels, de personnes, de méthodes de travail, de rythmes imposés, etc.
- « *d'utiliser une langue étrangère dans son domaine, à l'oral et à l'écrit* », avec notamment plusieurs articles scientifiques écrits en anglais et des présentations orales réalisées en anglais lors de conférences internationales ;
- « *de développer sa gestion de carrière en maîtrisant sa réputation par une reconnaissance par les pairs* ».
  À mes yeux, les marqueurs visibles de cette reconnaissance par les pairs se trouvent dans les articles publiés, dans la présence à des conférences internationales reconnues, dans la participation à des comités d'experts de référence (Anses, HCSP, OCDE, CEN, AFISE), dans la sollicitation par mes pairs pour participer à des projets de recherche et dans la sollicitation pour relire des articles scientifiques ;

- « *de développer des qualités personnelles au service de son engagement professionnel, […] en s'appuyant sur la passion comme ressort de la motivation au travail* ».
  Je ne suis pas la personne la mieux placée pour juger objectivement de mes « qualités personnelles », mais je m'identifie très bien dans la dernière partie de cet extrait !

B. Principales limites et axes de progrès identifiés

« *C'est souvent très frustrant de constater le faible impact du travail scientifique sur l'action politique et régulatrice.* »

Andreas Kortenkamp [318]

La section A de cette partie 3 a présenté plusieurs apports potentiels de la démarche ERS, illustrés ou suggérés par les études de cas présentées, et qui peuvent contribuer à l'élaboration de politiques publiques visant des environnements favorables à la santé.

Les travaux réalisés ont également été l'occasion de réfléchir aux limites des apports de la démarche ERS, ainsi qu'à des propositions pour composer avec ces limites, ou préférentiellement, pour les dépasser.

Parmi ces limites et propositions, dont le développement demanderait d'autres travaux s'appuyant sur une démarche scientifique, cette section B présente et discute trois d'entre elles qui me paraissent importantes.

Relations dose-réponse non-monotones

D'une manière générale, les évaluations de risques se fondent préférentiellement sur des VTR pour caractériser la toxicité des substances, en particulier dans le cadre de la gestion des ICPE et des SSP [164]. Que ces VTR soient à seuil ou sans seuil (section 2.A.3), les relations dose-réponse associées sont supposées monotones et croissantes, c'est-à-dire que le risque (stagne ou) augmente lorsque la dose augmente : plus un individu est exposé, plus la possibilité ou la probabilité d'apparition de l'effet est grande.

Or, d'après le HCSP, « *les chercheurs toxicologues ont découvert que le principe de Paracelse, «* la dose fait le poison *», ne s'appliquait pas à de nombreuses molécules dans l'environnement, l'alimentation et les produits de consommation dont les perturbateurs endocriniens. Les réponses à ces substances sont dites « non monotones », c'est à dire qu'on les observe à des concentrations sous les seuils réglementaires et à un niveau variable selon les périodes de la vie* » [124]. Pour être plus précis :

- la citation de Paracelse est « *Qu'est-ce qui n'est pas poison ? Tout est poison et rien n'est sans poison. Uniquement la dose détermine qu'une chose n'est pas un poison* » [319]. Cette définition reste toujours valide, même si la relation entre dose et réponse peut être non monotone ;
- les courbes non monotones peuvent être observées avec d'autres substances que les perturbateurs endocriniens (d'autres types de modulation ou de toxicité sur des fonctions biologiques). L'homéostasie métabolique repose sur le fait que tout système est associé à système antagoniste, afin de garder les processus métaboliques sous contrôle. Ainsi, lorsqu'une substance toxique agit à une certaine concentration sur un système et produit un effet indésirable, elle peut aussi potentiellement agir sur le système antagoniste à une concentration différente.

Les courbes « en U » (Figure 20) ou « en cloche » (Figure 21) sont des exemples de courbes non monotones parmi les plus fréquemment observées. Dans certains cas, ces courbes peuvent être des portions de courbes plus complexes, telles que des courbes triphasiques. Par exemple, une courbe peut commencer par un niveau basal bas, présenter ensuite une augmentation avec un pic (apparition de l'effet), puis diminuer avec une dépression (disparition de l'effet), puis enfin augmenter à nouveau (Figure 22). Par exemple, c'est le cas d'effets mortels pour lesquels une absence de mortalité est observée pour les doses les plus faibles ; en augmentant la dose, la mortalité apparaît et augmente jusqu'à un pic (due à l'activation d'une cible primaire), puis diminue pour atteindre une dépression due à l'activation d'une cible secondaire antagoniste de moindre affinité, puis augmente de nouveau par activation d'une ou plusieurs cible(s) ternaire(s) présentant des affinités encore plus faibles (donc activées à de plus fortes doses) (Figure 12).

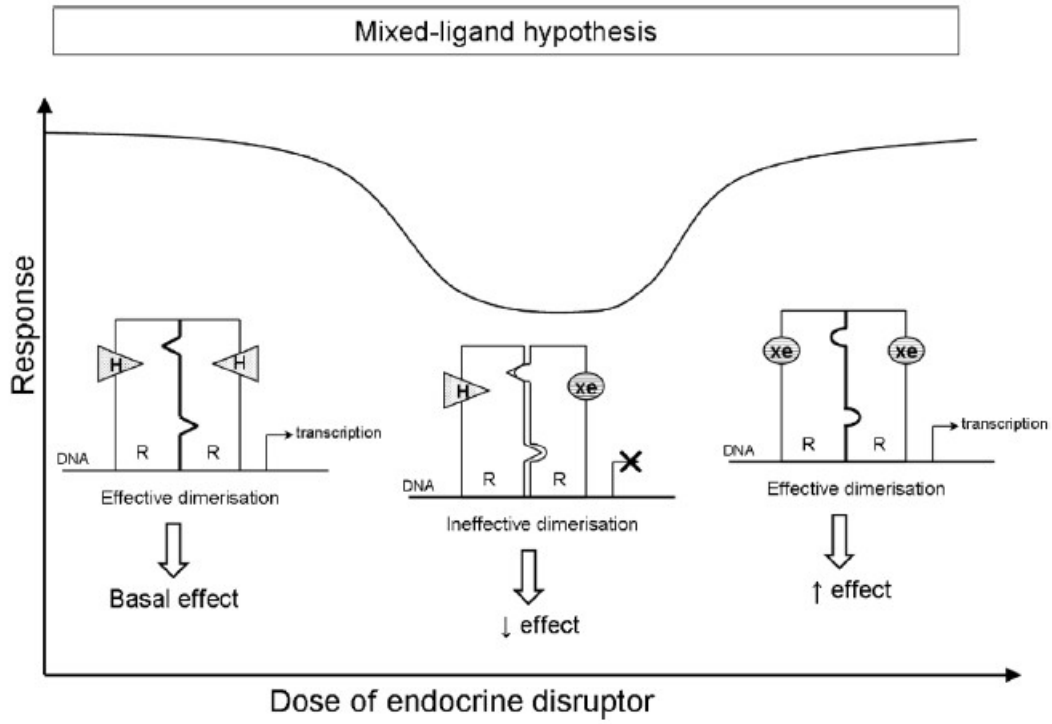


Figure 20 : Exemple d'une relation dose-réponse avec une forme « en U » (Lagarde et al. 2015) [320]

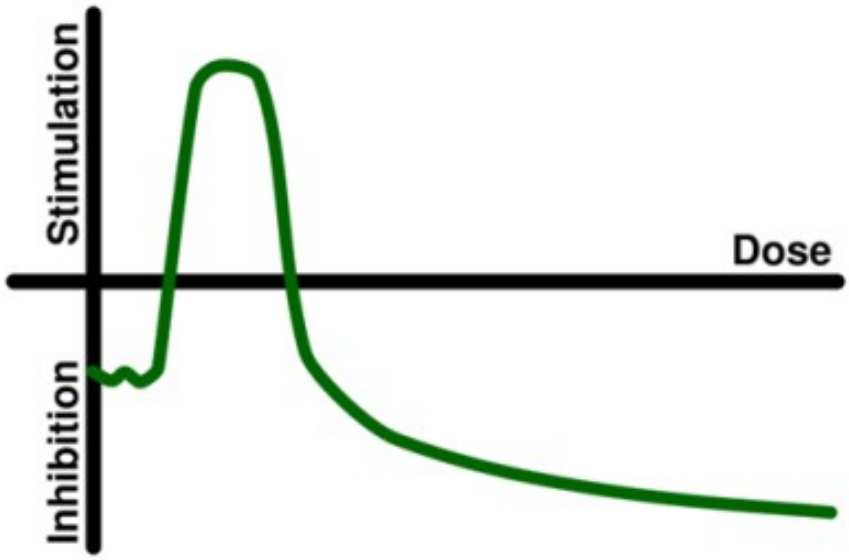


Figure 21 : Exemple d'une relation dose-réponse avec une forme « en cloche » (parfois aussi appelée « en U inversé ») (Anses 2019) [321]

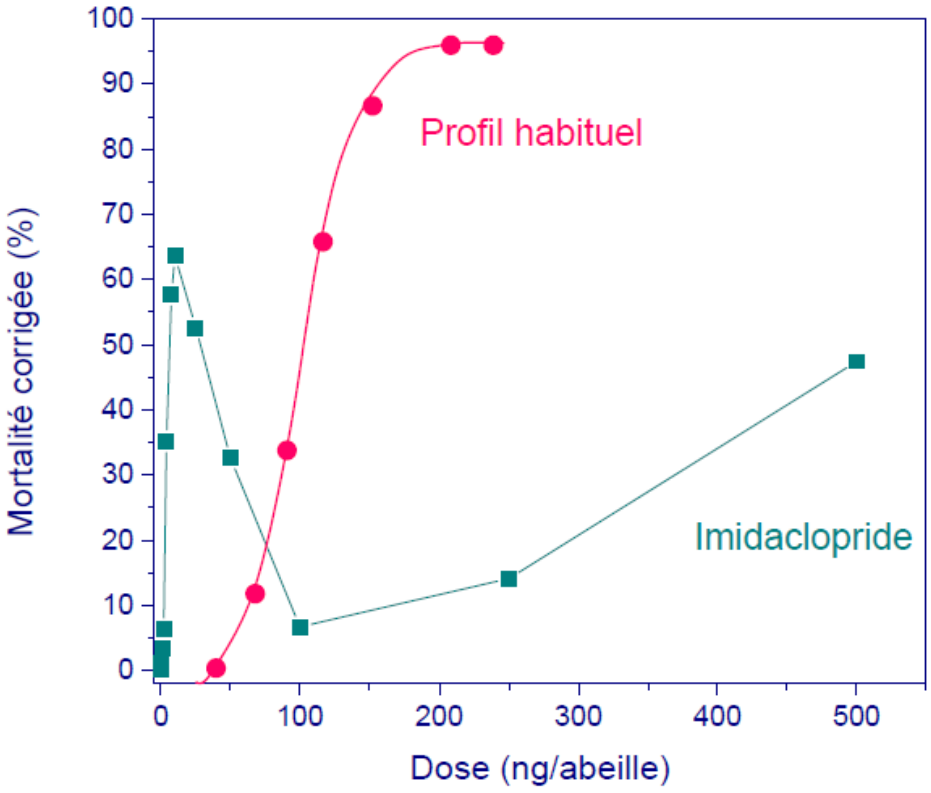


Figure 22 : Exemple d'une courbe triphasique - Relation dose-mortalité de l'imidaclopride chez l'abeille. Adapté de Suchail et al. [322]

Les deux profils de la Figure 22 ont été observés expérimentalement. Selon la génétique des abeilles, on peut observer un profil monophasique habituel ou un profil non monotone triphasique.

En particulier, ces relations dose-réponse non-monotones (DRNM) [80] incluent des gammes d'exposition où l'effet toxique augmente quand la dose d'exposition diminue ; en d'autres termes, pour cette gamme de doses, l'effet diminue quand la dose augmente. Par conséquent, les modes d'élaboration et d'utilisation des VTR actuelles ne traduisent pas bien la complexité de la toxicité de certaines substances, ce qui peut conduire à certaines sous-estimations des risques. D'après Robert Barouki, biochimiste et toxicologue internationalement reconnu, « *une conséquence importante des courbes non monotones est que les tests réglementaires devraient désormais couvrir une gamme de doses beaucoup plus importante que précédemment, afin de ne pas ignorer un effet spécifique à faible dose, et que l'identification des valeurs de référence pourrait devenir encore plus difficile que par le passé* » [323]. Cette recommandation de tester une plus large gamme de doses, incluant des doses plus faibles, n'est pas nouvelle [322]. Néanmoins, la notion de faible dose varie selon les auteurs [324] et il sera probablement difficile de fixer un seuil de faible dose ou un nombre de doses maximal à tester qui soit pertinent pour toutes les substances.

Cette limite des ERS actuelles souvent mise en avant - à juste titre, selon moi - ne me semble pas disqualifier la démarche ERS en tant que telle. À mon sens, ces nouvelles connaissances me semblent surtout montrer que la relative simplicité des « *compromis* » [323] ayant permis le développement de la toxicologie réglementaire, et datant des années 1960, atteignent leur limite pour représenter des phénomènes toxicologiques plus complexes, et donc moins facilement gérables par un processus systématique. De plus, que la courbe dose-effet soit monotone ou non, il y a toujours un niveau d'induction des effets.

Plus qu'une refonte de la démarche ERS, à ce stade je crois qu'il faut plutôt s'attendre à ce que les toxicologues produisent des caractérisations de toxicité plus complexes - les VTR produites par l'Anses en 2025 pour les particules en suspension dans l'air ambiant en constituent un exemple récent [310] - et que les évaluateurs de risques devront probablement adapter leurs caractérisation des risques en conséquence [325]. En attendant, les ERS peuvent signaler la présence de perturbateurs endocriniens dans les émissions étudiées – par exemple, cette notion a été explicitement ajoutée dans mes études à partir de celles portant sur les produits ménagers - en s'appuyant notamment sur des listes de référence [204, 205, 326]. Plus généralement, les VTR actuelles couvrent imparfaitement d'autres types d'effets [175, 184, 327], tels que les effets sensibilisants et les effets liés aux substances à l'état nanoparticulaire. En attendant de pouvoir évaluer ces effets de manière adéquate dans les ERS, plusieurs mesures de gestion peuvent être envisagées. Par exemple :

- pour les produits de consommation courante, demander aux fabricants d'identifier les substances émises qui sont sensibilisantes, PE, à l'état nanoparticulaire, etc. et, le cas échéant, en mentionner la présence sur l'emballage du produit. Cela peut être illustré (i) avec les substances sensibilisantes, pour lesquelles cette mesure de gestion est intégrée à la *Procédure de qualification des émissions de composés organiques volatils par les matériaux de construction et produits de décoration* établie par l'Anses en 2009 [146] ; (ii) avec les substances à l'état nanoparticulaire, pour lesquelles le marquage [nano] est obligatoire pour trois types de produits : produits cosmétiques et produits biocides depuis 2013 ; denrées alimentaires depuis 2014 ;
- réaliser des campagnes de sensibilisation sur la notion de sobriété chimique [328], au regard de la maîtrise imparfaite des risques par les pouvoirs publics, dans une logique de prudence.

En particulier, la sobriété chimique fait écho à la logique des principes généraux de prévention [222, 329], le premier principe étant « *éviter les risques* » ;

- réglementer en se fondant sur une logique de danger, plutôt que sur une logique de risque.
  Cette mesure de gestion pourrait être vue comme la conséquence logique d'une impossibilité technique, à ce stade, d'évaluer les risques de certaines substances. Plus généralement, il me semble que si des moyens significatifs ne sont pas affectés à la recherche en santé environnementale [330], alors on obtient un contexte de faibles connaissances pour les ERS, un contexte de fortes incertitudes, ne permettant pas d'assurer l'absence de situation préoccupante autrement qu'avec des mesures de gestion associées à un fort niveau de prudence. Avec les mots de Rémy Slama, épidémiologiste environnemental internationalement reconnu : « *Il y a des alternatives au principe de précaution. Si la science était beaucoup plus rapide à fournir des certitudes, il serait probablement peu utile. Mais rendre la science plus rapide reviendrait à accepter de donner des moyens considérables à la recherche et la surveillance en santé environnementale. Ainsi, on peut voir l'application du principe de précaution comme la conséquence du choix de ne pas vouloir d'une science forte, dotée de moyens considérables* » [112]. Compte tenu de la complexité de la tâche – notamment au regard de certains aspects présentés plus haut : grand nombre de substances chimiques et de leurs produits dérivés (métabolites et produits de transformations physico-chimiques), difficultés à appréhender les effets des mélanges, fenêtres de vulnérabilité, etc. - il est possible que des « *moyens considérables* » ne suffisent pas à ce que la science fournisse rapidement des certitudes, tout du moins à ce stade.

Gestion par le danger

Cette alternative à la gestion par le risque est une option qui peut donc être retenue dans un contexte où les connaissances disponibles ne sont pas suffisantes pour pouvoir réaliser des ERS de qualité. Elle peut également être retenue pour les types de dangers qui font l'objet des plus fortes préoccupations. Par exemple : les règlements européens (CE) 1107/2009 sur les produits phytosanitaires et (EU) 528/2012 sur les produits biocides interdisent les CMR (1A et 1B) et les PE. Pour ces types de dangers jugés très préoccupants (CMR, PE, neurotoxiques, etc.)[28], on peut vouloir éviter de gérer par le risque, car cela reviendrait au final à gérer par l'intermédiaire d'une dose d'exposition jugée non préoccupante, acceptable. Par exemple, les inspections générales de la Santé et de l'Environnement ont recommandé que la troisième Stratégie nationale sur les perturbateurs endocriniens (SNPE 3) « *se donne pour horizon « zéro exposition aux PE »* » [331]. En effet, compte tenu de la gravité de ces dangers jugés très préoccupants, les pouvoirs publics pourraient vouloir éviter la possibilité que la production de nouvelles données montre, par la suite, que la dose retenue n'était finalement pas assez protectrice. Le cas du bisphénol A en fournit une illustration assez parlante [65, 332] : la dose

[28] On pourrait élargir à la notion de propriétés très préoccupantes. Par exemple : substances persistantes, bioaccumulables et toxiques (*Persistent, Bioaccumulative and Toxic substances* - PBT) ou très persistantes et très bioaccumulables (*very Persistent and very Bio-accumulative* - vPvB), en cohérence avec la notion de substances extrêmement préoccupantes (*Substances of Very High Concern* - SVHC) associée au règlement REACH (règlement européen en matière de substances chimiques).

journalière tolérable (DJT) a évolué de 50 µg/kg_{pc}/j en 1986 à 4 µg/kg_{pc}/j en 2015, puis à 0,0002 µg/kg_{pc}/j en 2023, soit une diminution du seuil sanitaire initial par un facteur 250 000. En ce sens, l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques (OPECST) souligne : « *les autorités chargées de la gestion du risque sont incitées à adopter une attitude des plus précautionneuses, pour éviter toute « mauvaise surprise* » » [114].

Cette logique de prudence pourrait plus particulièrement s'appliquer pour des produits destinés à des populations sensibles. Par exemple, au moment de la rédaction de cette thèse, les jouets sont réglementés par la directive européenne 2009/48/CE relative à la sécurité des jouets, et la Commission européenne prévoit de faire évoluer cette réglementation vers une gestion par le danger étendue : « *La directive contient déjà une interdiction générale, dans les jouets, de substances cancérigènes, mutagènes ou toxiques pour la reproduction (CMR). Il n'est toutefois pas fait référence à d'autres substances particulièrement préoccupantes, telles que les perturbateurs endocriniens ou les substances affectant les systèmes immunitaire, nerveux ou respiratoire* » [333]. Néanmoins, la démarche ERS permet aussi de traduire un objectif de plus fort niveau de protection, pour des effets particulièrement préoccupants ou pour des populations présentant des vulnérabilités particulières, notamment avec la possibilité d'ajout de facteurs de sécurité dans les calculs d'indicateurs de risque. Par exemple, un *mixture assessment factor* (MAF) permettrait de tenir compte des préoccupations liées aux effets des mélanges (section 2.C.2).

Le *Age Dependent Adjustements Factor* (facteur d'ajustement lié à l'âge des personnes exposées - ADAF) constitue un autre exemple qui, lui, vise à tenir compte de la sensibilité particulière des enfants aux effets mutagènes. En ce sens, une revue de littérature réalisée par l'Ineris en 2023 [334] invite à dorénavant intégrer les ADAF dans les ERS réalisées pour la gestion des émissions des ICPE.

Plus généralement, plutôt que d'opposer ces logiques de gestion - parfois de manière un peu caricaturale, à mes yeux – il me semble qu'une articulation visant à obtenir le meilleur de ces deux logiques pourrait être recherchée. Par exemple, dans le contexte réglementaire, on pourrait imaginer :

- un premier niveau de criblage réglementaire fondé sur une logique de danger [335], visant notamment les effets toxiques les plus graves et les plus difficiles à caractériser en l'état des connaissances ;
- dans un second temps, la démarche ERS pourrait être utilisée pour la gestion :
    - des autres types de dangers.
      Pour garder cette démarche raisonnablement faisable, la Commission européenne oriente sa stratégie vers « *une évaluation par groupes de substances présentant des similitudes structurelles ou fonctionnelles* » [108]. Les limites de cette approche ont été abordées plus haut (section 2.B.2) ; en particulier, l'ajout ou le retrait de certains groupements à des substances d'une même famille peut conduire à une action sur d'autres cibles biologiques, et donc à des effets différents. Néanmoins, il est possible que cette approche soit retenue comme un compromis opérationnel, de manière temporaire et avec

une logique de prudence[29], entre les actions qui découlent de l'état des connaissances et les moyens disponibles pour mener à bien ces actions ;

- des dérogations d'exception au premier criblage, pour des « *usages essentiels* » [178] identifiés dans une logique d'intérêt général, pour pouvoir toujours profiter de substances toxiques présentant une grande utilité à la société. L'ERS peut ici alimenter une réflexion de type bénéfices/risques [336], s'inspirant notamment de celle utilisée dans le domaine médical.

On pourrait aussi imaginer une situation intermédiaire où, en attendant un potentiel élargissement du périmètre des dangers interdits [337], les dangers jugés suffisamment graves sont gérés avec une logique de risque intégrant des facteurs de sécurité complémentaires [278]. À l'image du *mixture assessment factor* ou du *age dependent adjustements factor*, un « *most serious hazard factor* » pourrait être considéré dans les ERS pour les dangers jugés le plus préoccupants. Ainsi, articuler logique de danger et logique de risque pourrait permettre une gestion plus fine, plus faisable[30] et plus adaptable[31] qu'une unique gestion par le danger, mais aussi plus protectrice qu'une unique gestion par le risque. De plus, cette articulation serait également bien cohérente avec les principes généraux de prévention [222, 329], qui placent le principe « *éviter les risques* » avant le principe « *évaluer les risques* ».

La priorité donnée à la gestion par le danger, ainsi que la possibilité d'ajouter des facteurs de sécurité pour certains types d'effets et de populations, voire même pour des « *usages sociétaux non essentiels* » [108], permettraient également de continuer à stimuler la recherche de substances présentant moins de toxicité pour un même niveau d'efficacité.

Enfin, pour mémoire, le projet hiérarchisation de substances (section 2.B.1) a été aussi l'occasion d'articuler logique de gestion par le danger et logique de gestion par le risque, avec d'autres critères pouvant participer à d'autres logiques de choix. De plus, l'analyse multicritère incluse dans la méthode générale permet de faire varier les poids accordés à chaque logique, et d'observer l'influence sur les résultats obtenus.

Influence limitée des résultats d'ERS dans la décision publique

La troisième limite que je souhaiterais développer ici est un retour d'expérience, issu de mon parcours personnel - qui est néanmoins corroboré par le retour d'expérience de nombreux

[29] On ne conclut pas à l'absence d'un danger sur la base d'une similarité de structure. Néanmoins, on peut suspecter - et conclure provisoirement, dans une logique de prudence à - un danger sur la base d'une similarité de structure, en attendant des données permettant de conclure plus rigoureusement.

[30] Exiger une absence totale de danger pour la santé (comme peut être compris le « *droit reconnu à chacun à respirer un air qui ne nuise pas à sa santé* » (article L220-1 du Code de l'environnement)), peut susciter de la démobilisation chez les pouvoirs publics par son aspect assez inatteignable.
Par ailleurs, la gestion par le risque demande plus de moyens, notamment du fait du principe de spécificité. En ce sens, la Commission européenne indique : « *La complexité des procédures d'évaluation est un problème particulier pour les autorités et les parties prenantes. Elle peut entraîner […] des lenteurs dans les procédures, une utilisation inefficace des ressources et créer des charges inutiles* » (cf. Stratégie pour la durabilité dans le domaine des produits chimiques de 2020).

[31] Par exemple, il semble inapproprié de viser à réduire à zéro les concentrations en particules fines en suspension mesurées dans l'air.

experts avec qui j'ai pu en discuter ou que j'ai pu lire - qui est le constat de l'influence limitée des résultats d'ERS sur la décision publique en matière de santé environnementale, au final.

Un exemple symbolique me semble être celui des produits de consommation courante. À la demande directe du ministère de l'Écologie, et dans le cadre du PQAI [31] (intégré au PNSE 3 [2]), des ERS ont été réalisées pour différents types de produits de consommation courante (section 2.C.1), dans l'objectif :

- d'identifier les produits associés aux plus forts risques, et d'apprécier les enjeux sanitaires associés ;
- de proposer des substances d'intérêt pour appuyer la potentielle mise en place d'un étiquetage sur les émissions de ces produits, si les risques identifiés avaient besoin d'être réduits.

Ces études ont été produites en s'appuyant sur des financements publics significatifs, avec notamment la réalisation de sondages nationaux sur les usages et de mesures effectuées dans une maison expérimentale (section 2.C.1) ; elles ont fait l'objet d'une satisfaction exprimée de façon écrite et orale par le ministère, à plusieurs reprises ; elles ont conduit à la publication de plusieurs articles scientifiques, notamment dans des revues internationales reconnues ; elles ont fait l'objet de plusieurs présentations orales, notamment dans des conférences internationales de référence et dans des GT de suivi et d'élaboration de trois PNSE. En résumé, je crois qu'on peut raisonnablement considérer que ces études ont été jugées comme étant des travaux de qualité, répondant aux questions opérationnelles qui étaient initialement posées. Et pourtant, ces études me semblent avoir eu une faible influence sur la décision publique qu'elles étaient censées éclairer, au final. Par exemple :

- aucun étiquetage sur les émissions de produits de consommation n'a été mis en place par les pouvoirs publics, alors que les études réalisées ont conclu que les émissions de ces produits auraient besoin d'être réduites et que certains enjeux sanitaires étaient significatifs. Par exemple, pour certains encens, la valeur sanitaire du benzène pour les effets de court terme a pu être dépassée de plus de 8 fois, et celle pour les effets chroniques de plus de 10 fois [21] ;
- le PNSE 4 ne mentionne pas ces études, ou leurs résultats, ou les enjeux associés, lorsqu'il décrit les enjeux liés à la qualité de l'air intérieur [109] ;
- les produits de consommation courante qui ont été retenus dans le PNSE 4 pour l'élaboration d'une méthode pouvant devenir la base d'un système d'étiquetage (qui s'avèrera être sur la composition des produits, uniquement [61]) sont les produits ménagers. Pourtant, d'après la synthèse des travaux réalisées [43], les produits ménagers ont été classés comme les produits étudiés présentant les enjeux sanitaires les plus faibles.

De fait, d'autres critères ont influencé la décision publique.

Le projet d'élaboration d'une méthode de hiérarchisation de substances préoccupantes (section 2.B.1) présente certaines similarités avec la situation décrite ci-dessus, et un contexte également favorable : il s'agissait d'une demande directe des pouvoirs publics, répondant à une action importante du PNSE 2 [17] ; l'étude a fait l'objet de financements publics significatifs ; les travaux ont été salués par le ministère chargé de l'Écologie et par les parties prenantes impliquées, puis mis en avant dans une conférence de presse ; ils ont fait l'objet

d'articles scientifiques et de présentations orales, etc. Et pourtant, cette méthode n'a finalement pas été utilisée dans la préparation du PNSE 3([32]), qui n'a même pas inclus de liste de substances prioritaires pour l'action publique.

Approfondir et mieux comprendre les processus qui ont amené à ces constats pourraient faire l'objet de travaux assez intéressants, à mes yeux, en s'appuyant notamment sur des collaborations avec des chercheurs issus de sciences humaines. À ce stade, je ne peux ici qu'ébaucher quelques hypothèses, sur la base de mes observations personnelles et sur des aspects qui m'ont semblé fortement influencer certaines décisions que j'ai suivies :

- les élaborations de politiques publiques dont j'ai pu être l'observateur, indirectement le plus souvent, m'ont paru être réalisées dans de relativement courtes périodes, des périodes trop courtes pour avoir le temps de s'approprier et de décliner une méthode comme celle élaborée pour la hiérarchisation de substances préoccupantes, par exemple. Si c'était à refaire, je crois que je prévoirais du temps dans le projet pour sensibiliser des personnes clés de l'élaboration à venir, un peu avant le début des travaux d'élaboration, pendant qu'elles ont encore de la disponibilité (temporelle et mentale) pour comprendre les avantages que la méthode peut leur procurer dans l'élaboration à venir. De plus, j'essaierais de faire cet exercice de manière très synthétique, en focalisant sur un nombre limité de points clés. En ce sens, dans le Que Sais-je « *L'expertise en santé publique* », Claude Got souligne : « *Quand un politique veut agir, il faut lui proposer des décisions importantes et en nombre limité, dans des délais courts. Il est parfois impossible d'éviter de répondre à une « demande étendue », mais il faut savoir que l'on travaille alors pour l'histoire et non pour une efficacité décisionnelle. […] Il faut répondre à une question au moment où celui qui la pose a l'intention d'agir* » [288] ;
- les jeux d'acteurs et les pressions mises sur les pouvoirs publics par les différentes parties prenantes m'ont paru constituer un des principaux facteurs dans la prise de décision.
  Si c'était à refaire, ici aussi, je viendrais présenter les études aux futurs décideurs avant que les travaux d'élaboration ne commencent - ce qui est possible avec le positionnement d'appui technique « du quotidien » de l'Ineris en direct auprès du ministère de l'Écologie - pour leur rappeler leur existence (ou les en informer parfois) et afin qu'ils disposent de « *recommandation[s] aussi objectivement fondé[e]s que possible* » [315] avant de rentrer dans des phases de négociations intenses.
- Enfin, si les risques sanitaires associés aux différentes options de gestion considérées constituent un critère important de la décision publique, d'autres critères sont également considérés en pratique, bien évidemment. Ceci peut être observé chez les pouvoirs publics, dans des groupes de parties prenantes et également au niveau individuel. Ceci me semble légitime et c'est sur cette problématique initiale que s'est notamment construit le projet de hiérarchisation de substances préoccupantes.
  Que d'autres critères jouent un rôle important dans la prise de décision me paraît inévitable et légitime *a priori*. Ce qui est moins acceptable, c'est que ces critères ne soient pas explicités, avec leurs valeurs[33] sociales et éthiques ou les options politiques sous-jacentes [299]. Et idéalement, la logique de choix qu'ils définissent devrait

[32] Certains résultats ont pu néanmoins alimenter les réflexions pour l'élaboration de la première Stratégie nationale sur les perturbateurs endocriniens (SNPE).
[33] Par exemple : équité, solidarité, liberté, prudence, responsabilité, etc.

acquérir une part de sa légitimité en étant précédée d'échanges avec les différentes parties prenantes intéressées. En ce sens, la démarche utilisée dans la méthode de hiérarchisation construite (section 2.B.1) me semble pouvoir être appliquée dans d'autres contextes. La transparence du raisonnement explicité permet notamment de mieux clarifier et de mieux justifier les choix retenus ; en amont, cette démarche donne aussi aux parties prenantes une meilleure capacité à discuter les choix proposés et à faire des propositions alternatives robustes. Enfin, l'effort de justification associé à la démarche ERS pourrait également limiter la dérive qui consiste à accepter toutes les propositions des parties prenantes « *pour faire plaisir* » [126].

Ces premières idées sont directement reliées à la notion de communication sur les risques, entre évaluateur et gestionnaires ou entre gestionnaires et parties prenantes. Ceci fait écho à la manière dont la Commission européenne définit l'analyse des risques, qui se compose de « *trois volets interconnectés […] - évaluation des risques, gestion des risques et communication sur les risques – [qui] constituent une méthodologie systématique pour déterminer des mesures efficaces, proportionnées et ciblées ou d'autres actions pour protéger la santé* » [338].

C. Pistes pour de prochains éléments de réponse à construire - perspectives de contributions futures

« *Il faut agir en homme de pensée et penser en homme d'action.* »

Henri Bergson [339]

Les études de cas présentées à la partie 2 ont été accompagnées d'analyses réflexives, incluant des propositions de prochains travaux possibles, sur la base des limites discutées ou d'idées d'approfondissements identifiées. La présente section développe trois propositions sur lesquelles j'aimerais plus particulièrement travailler, dans la suite de mon parcours professionnel.

Indicateur de bénéfices sanitaires

Lors de réflexions portant sur le futur usage d'un site, et en particulier lorsqu'une pollution de sol est présente, le gestionnaire du site et les différents acteurs concernés considèrent classiquement plusieurs types de critères. Parmi les critères considérés figurent les résultats disponibles d'ERS et d'ERE, qui caractérisent respectivement les risques sanitaires et environnementaux associés aux différents usages envisagés. Ces caractérisations sont exprimées quantitativement et associées à des critères d'acceptabilité (section 2.E.1). En parallèle, les effets sanitaires bénéfiques potentiellement associés aux différents usages envisagés sont, eux, non évalués. En particulier, il n'existe pas de méthode permettant de quantifier ces effets bénéfiques avec des indicateurs standardisés, comme c'est le cas pour les ERS [52] et les ERE [252]. Ce manque d'évaluation formelle et standardisée participe à un contexte défavorable à la prise en compte des effets sanitaires bénéfiques, dans le choix multicritère de l'usage retenu pour le site étudié.

Sans surprise donc, les potentiels effets sanitaires bénéfiques ne font pas partie des raisons conduisant à mettre en œuvre un projet de renaturation d'un SSP, d'après les retours d'expériences collectés avec les interviews réalisées à l'occasion de l'élaboration de la proposition de méthode pour encadrer ce nouvel usage réglementaire (section 2.E.1). Selon les chefs de projet interrogés, ces raisons incluent des coûts pouvant être considérablement réduits (par exemple, pas d'excavation de sol pour un traitement hors site), des services écosystémiques qui peuvent contribuer à résoudre certains problèmes locaux (par exemple, le risque d'inondation) ou mondiaux (par exemple, le changement climatique), une façon de rendre plus acceptable la densification en cours des zones urbaines, des possibilités de subventions publiques, des engagements pris dans le cadre de politiques publiques liées à l'environnement et au développement durable, la possibilité que les populations locales se réapproprient le site. Dans ce contexte, est-il faisable d'élaborer un cadre méthodologique pour l'évaluation des effets sanitaires bénéfiques liés à l'usage de renaturation pour un SSP ? Et si oui, quel serait le contenu de ce cadre méthodologique ?

Les travaux que j'envisage auraient pour objectif de réfléchir à la faisabilité de l'élaboration d'un indicateur qui caractériserait les potentiels bénéfices sanitaires associés aux espaces de nature créés avec l'usage de renaturation, en tant que milieux de vie qui soutiennent activement la santé. Cet indicateur serait, en quelque sorte, le pendant des QD et ERI des ERS, contribuant ainsi à mieux prendre en compte l'ensemble de l'influence de l'environnement sur la santé [340], tel que traduit par le continuum sources-vecteurs-cibles augmenté (Figure 9).

Compte tenu que la littérature sur les effets bénéfiques du contact avec la nature est bien moins fournie que celle sur les effets délétères des polluants environnementaux, cet indicateur serait probablement moins précis qu'un ERI, par exemple. Néanmoins, le nombre d'aspects caractérisant un environnement naturel (notamment : ouverture, surface, densité, présence de végétation, présence d'eaux de surface, luminosité, etc.) pourrait être largement moins élevé que le nombre de substances artificielles produites (plus de 100 000, rien que sur le marché européen), et donc le besoin de VTR associé, ce qui est un élément de contexte favorable à l'élaboration d'un tel indicateur.

Par exemple, les compléments d'étude sur l'opportunité et la faisabilité d'un indicateur de bénéfices sanitaires pourraient inclure les étapes suivantes :

- recensement des principales caractéristiques des environnements naturels qui sont associées à des effets bénéfiques dans la littérature scientifique [68, 238, 256] ;
- pour chaque caractéristique et chaque effet bénéfique, évaluation du niveau de preuves associé.
  Pour ce faire, la pyramide de niveaux de preuves utilisée en médecine fondée sur les preuves (*Evidence-Based Medicine* - EBM) pourrait être un point de repère utile [257]. Les aspects « à seuil » ou « sans seuil » des effets sanitaires bénéfiques serait un des aspects intéressants à approfondir ;
- élaboration d'un score caractérisant l'ampleur des bénéfices associés à un espace de nature créé avec un usage de renaturation. Ce score pourrait tenir compte de la grandeur de la surface créée, des impacts positifs associés aux caractéristiques de cet espace (gains sanitaires associés, niveaux de preuves associés), de l'ampleur de la population pouvant être au contact de cet espace, etc.

Ces travaux pourraient notamment s'appuyer sur des collaborations avec :

- des écologues ayant travaillé sur le sujet de la renaturation dans un contexte urbain [341-344].
  Par exemple, cela pourrait être l'occasion de développer les premiers contacts pris avec l'Agence régionale de la biodiversité en Île-de-France (ARB IdF) et de proposer des collaborations au Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (Cerema). Au regard des compétences de ces organismes, j'imagine que de futures collaborations pourraient notamment porter sur :
  - la revue de littérature scientifique que je prévois, dans l'objectif d'assurer sa complétude et d'assurer ma bonne compréhension (je n'ai que quelques années d'expérience professionnelle dans le domaine de la renaturation (restauration écologique)) ;
  - de premières applications de l'indicateur élaboré sur des projets menés ou suivis par l'ARB IdF et le Cerema, dans l'objectif de tester sa faisabilité et d'obtenir de premiers retours d'expérience.

- des ingénieurs sanitaires et des chercheurs ayant travaillé sur le lien entre santé et nature [68, 238, 345].
  Par exemple, cela pourrait être l'occasion de développer des collaborations avec l'Observatoire régional de santé (ORS) Île-de-France et avec le centre technique Plante & Cité. Au regard des compétences de ces organismes, j'imagine que de futures collaborations pourraient notamment porter sur :
    - la revue de littérature scientifique que je prévois, notamment dans l'objectif d'assurer sa complétude ;
    - des réflexions communes au sein d'un GT dédié, qui aurait pour objectif de proposer un contenu et des règles pratiques de renseignement pour cet indicateur, en se fondant sur ce que la littérature scientifique permet d'affirmer ou non, à ce stade.

Ce nouvel indicateur pourrait conduire à une évaluation sanitaire « augmentée », tenant compte à la fois des effets délétères et des effets bénéfiques de l'environnement sur l'humain. Et ainsi, une « évaluation des bénéfices sanitaires (EBS) » pourrait compléter la classique évaluation des risques sanitaires (ERS), et par exemple, conduire à une intégration du type « évaluation des risques et des bénéfices sanitaires (ERBS) ».

Pour le décideur public, cette ERBS permettrait d'apporter un éclairage plus complet sur les effets sanitaires attendus pour chacune des options qu'il considère. Par exemple, si un SSP peut être transformé en zone de stationnement automobile ou bien en parc à forte naturalité, cette différence notable attendue pour la santé des riverains a besoin de pouvoir être formellement prise en compte dans le bilan coûts-avantages ou bénéfices-risques réalisé à l'occasion du choix du futur usage du site. Plus généralement, cet éclairage plus complet pourrait également être utile dans d'autres contextes et pour d'autres types de projets d'aménagement. Par exemple, pour rénover une cour d'école, choisir des espaces goudronnés et choisir des espaces végétalisés de pleine terre constituent deux options dont les différences pourraient être mieux caractérisées.

Études pour obtenir un permis d'exploiter une ICPE : parangonnage international

Dans le domaine de la santé environnementale, afin de situer les politiques publiques de la France au regard de celles d'autres pays en Europe et dans le monde, des parangonnages (« benchmarking ») ont pu être réalisés sur diverses thématiques. Par exemple, concernant des thématiques en lien avec les activités de l'Ineris en santé environnementale : politiques publiques portant sur la qualité de l'air intérieur [346], méthode de gestion des sites et sols pollués [347], valeurs de gestion dans les sols [348], valeurs repères et réglementaires dans l'air intérieur en lien avec les sites et sols pollués [349], stratégies de réduction des rejets de micropolluants par les eaux usées [350]. Cet exercice formel de parangonnage n'a pas été réalisé pour les études sanitaires appuyant l'obtention d'un permis d'exploiter des sites industriels depuis environ 20 ans [351]. Il en résulte que nous disposons d'une vision assez parcellaire de la manière dont sont actuellement gérées les émissions des ICPE (ou de leurs équivalents) dans d'autres pays, et notamment dans des pays présentant des caractéristiques raisonnablement similaires à celles de la France.

Les travaux envisagés consisteraient à réaliser un parangonnage des études sanitaires demandées dans le processus d'autorisation d'exploiter des installations industrielles. Le périmètre de ce parangonnage serait international, mais en commençant par une première

étape portant sur les pays de l'Union européenne, au regard de certaines réglementations communes concernant les sites industriels, avec en particulier la directive européenne sur les émissions industrielles (directive IED) [226].

Ce parangonnage aurait un double objectif :

- situer le niveau d'exigence de la France par rapport à d'autres pays raisonnablement similaires ;
- identifier des bonnes pratiques appliquées dans d'autres pays et applicables en France, afin de poursuivre l'affinage et l'amélioration des lignes directrices actuelles pour la gestion des émissions des ICPE.
  Cette analyse de bonnes pratiques à l'international pourrait ainsi alimenter la prochaine mise à jour du guide ICPE [52].

La réalisation de ce parangonnage pourrait débuter par la consultation de trois types de sources de données :

- les sites Internet institutionnels des organismes publics des États membres en charge de la gestion des permis d'exploiter des installations industrielles. Ce type de recherches fait écho à celles réalisées dans le cadre des travaux menés sur la gestion des liens d'intérêt (section 2.E.1).
  Sur ces sites Internet, je m'attends notamment à trouver des guides méthodologiques de référence, des renvois vers les principaux textes réglementaires concernés, et des contacts vers des personnes ou des organismes techniques de référence à l'échelle nationale.
  Ces personnes et organismes pourraient être sollicités avec deux objectifs :
  - demander des informations sur les principaux processus réglementaires du pays et sur les types d'études associées,
  - demander une confirmation de notre bonne compréhension, sur la base d'une courte synthèse centrée sur les aspects importants pour notre étude et sur le contenu des études sanitaires demandées par les pouvoirs publics ;
- les personnes référentes concernant la directive IED dans chaque pays étudié, au niveau scientifique et technique.
  Étant en appui technique auprès du ministère chargé de l'Écologie sur les aspects liés à la directive IED, et étant en charge des aspects techniques de la contribution française à la mise à jour de plusieurs BREF [227], des experts de l'Ineris font partie de ce réseau européen de personnes référentes, ce qui facilitera les mises en contact initiales ;
- le réseau IMPEL (de l'anglais *European Union Network for the IMPlementation and Enforcement of Environmental Law,* Réseau de l'Union européenne pour l'application et le respect du droit de l'environnement), qui a pour mission d'assurer une mise en œuvre et une application efficaces du droit européen de l'environnement [352].

Acceptabilité des risques

En 2024 et 2025, l'Anses a élaboré des VTR par voie respiratoire pour l'exposition aux particules de l'air ambiant extérieur (PM_{10} et $PM_{2,5}$) [310]. Pour une gamme de concentrations moyennes annuelles en $PM_{2,5}$ comprises entre 5 et 30 $\mu g.m^{-3}$, l'ERU de décès toutes causes non accidentelles est de $1{,}28.10^{-2}$ $(\mu g.m^{-3})^{-1}$. Le « *niveau de confiance* » associé à cette VTR est « fort » [310].

À ce jour, il n'existe pas de consensus ou de recommandations sur des niveaux acceptables d'excès de risque sanitaire lié à l'exposition aux particules de l'air ambiant, en complément des critères d'acceptabilité associés aux risques calculés pour les substances présentes dans leur composition. En particulier, le critère d'acceptabilité d'un ERI inférieur à 10^{-5} [162], évoqué plus haut, porte sur les substances émises par les ICPE.

Néanmoins, la valeur de l'ERU élaboré par l'Anses pose des soucis majeurs en termes de gestion des risques. Par exemple : l'exposition par inhalation en $PM_{2,5}$ (concentration moyenne inhalée (CI) pendant la vie entière ; cf. Figure 6) correspondant à un excès de risque de 10^{-5} est de $10^{-5}/1{,}28.10^{-2} = 7{,}81.10^{-4}$ µg.m^{-3}, soit environ 0,8 ng.m^{-3}. Dans le cadre de la gestion des émissions des ICPE, retenir le même critère d'acceptabilité que pour les substances chimiques émises conduirait à ne pas autoriser l'exploitation d'une grande partie des ICPE. Puisque cette dernière conséquence devrait être associée à un fort impact sur la santé de la population générale et sur le fonctionnement général de la France, quelles règles de gestion retenir pour les émissions de particules par les ICPE ? Quels seraient les critères d'acceptabilité des risques associés ?

Des travaux pourraient consister à identifier les différentes règles de gestion possibles dans le cadre de la gestion des émissions en particules des ICPE, en accompagnant ces règles d'une description des avantages et des inconvénients associés. D'autres travaux pourraient consister à élaborer une méthode visant à construire le choix d'un « risque acceptable », toujours dans une logique d'appui au gestionnaire du risque.

Bien que la science constitue le point de départ de l'évaluation des risques, une décision sur ce qui constitue un « risque acceptable » me semble être essentiellement un jugement de valeur, un concept sociétal - s'appuyant notamment sur la meilleure science disponible et sur des quantifications de risques - plutôt qu'un concept scientifique. En ce sens, Sven Ove Hansson souligne : « *il faut faire confiance à la science pour déterminer les questions factuelles mais la science ne peut nous dire quoi préférer ou quoi choisir* » [353]. En particulier, l'acceptabilité du risque peut dépendre de nombreux facteurs autres que l'évaluation quantitative des risques. Par exemple : risque choisi ou imposé, risque évitable ou non, risque équitablement réparti ou non, risque artificiel ou naturel, risque accompagné de bénéfices ou non, risque contrôlable ou non, risque bien connu ou non, etc. [354]

Pour cette raison, il me semble que les travaux visant à éclairer ce choix politique de gestion des risques devraient être menés par un groupe de travail incluant, en complément d'experts en lien avec l'évaluation des risques, des experts de sciences humaines et sociales, des experts de l'évaluation socio-économique (ESE), ainsi que des représentants de la société. Pour ces derniers, une représentation « grenellienne »[34] pourrait être considérée, à l'image de ce qui a été fait dans le cadre du projet de hiérarchisation de substances préoccupantes (section 2.B.1).

Par ailleurs, les travaux de ce GT pourraient se fonder sur une revue approfondie de littérature, portant sur les différentes méthodes existantes pour parvenir à un « risque acceptable », à l'international, et sur les critères d'acceptabilité fréquemment utilisés. Une revue sur l'état de l'art en matière de perception des risques me paraît également essentielle, dans un premier niveau d'approche.

[34] C'est-à-dire incluant des représentants issus des types de « collèges » présents au Grenelle de l'environnement de 2007. Chaque collège visait à représenter les principaux acteurs impliqués dans les questions discutées : État, collectivités locales, associations, employeurs, syndicats.

En outre, comme le souligne l'OPECST, « *le travail des gestionnaires de risques est […] d'autant plus compliqué que tout le monde n'a pas la même définition de ce qu'est un risque négligeable et de ce fait acceptable* » [114]. Puisque la définition d'un risque acceptable varie selon les personnes, de même que celle d'une « *substance préoccupante sur laquelle agir en priorité* », une approche multicritère participative pourrait être considérée, également comme dans le projet de hiérarchisation de substances (section 2.B.1), ce qui aurait aussi l'avantage de clarifier les différentes logiques possibles derrière la notion de « risque acceptable ».

Cette question de l'acceptabilité des risques est une question complexe et délicate. Je ne ferai donc ici qu'indiquer succinctement mes premières réflexions sur le sujet, à ce stade.

- Les critères d'acceptabilité pourraient varier selon qu'il s'agit d'éviter une pollution ou de gérer une pollution existante.
- L'acceptabilité est avant tout un processus sociétal, le résultat d'échanges entre les personnes produisant, autorisant et subissant les risques. Il est donc possible qu'il faille inclure une composante locale à la manière dont cette acceptabilité est gérée en pratique : retenir une règle de gestion simple et applicable partout en France, comme c'était le cas jusqu'ici, pourrait ne plus être possible.
  Ainsi, comme le souligne Christine Noiville, « *un risque n'est pas en soi acceptable, il le devient par le prisme du débat, qui lui donne sa légitimité. L'acceptabilité n'est pas une essence qui s'imposerait à celui qui est confronté au risque. Comme le remarquent certains, aucun « nombre d'or » ne fixe en effet à un niveau précis la part de l'effort collectif et individuel qu'il est nécessaire ou illégitime de consacrer à la préservation de la santé et de l'environnement. Ce niveau ne peut être que le résultat d'un choix, variable en fonction de l'époque, du contexte, de la collectivité qui l'opère. […] Aussi, parce que le « risque acceptable » n'est pas un « donné » mais le fruit d'une appréciation à chaque fois renouvelée, le sens qu'il convient de lui attribuer doit autant que possible être négocié. Indépassable, le débat public l'est en outre et surtout du point de vue de la qualité du processus de décisions* » [299].
  La possibilité de recueillir des avis, voire d'organiser des échanges entre parties prenantes, présuppose la transmission des projets de décisions en amont, accompagnés des données et des motivations qui les fondent.
- S'il n'est plus possible d'atteindre le résultat voulu à court terme, alors l'exigence sur les moyens doit être forte. Le principe ALARA (de l'anglais *As Low As Reasonably Achievable* : aussi bas que raisonnablement possible) pourrait notamment être un des minimums exigés.
- Un risque acceptable, pour la personne qui le subit, me semble notamment être un risque qui s'inscrit dans un système national de bénéfices/risques globalement favorable à cette personne [353], et aussi dont la répartition est jugée être un compromis raisonnablement juste par cette personne.
- Raisonner avec un critère relatif du type « *ne pas augmenter de plus de x % le bruit de fond* » permettrait que la demande d'efforts aux industriels suive les progrès réalisés au plan général [355], notamment grâce aux politiques publiques visant une amélioration de la qualité de l'air extérieur.
- Le champ des réflexions pourrait être élargi au-delà du cas spécifique des particules fines. Par exemple, en 2025, l'US EPA a produit une VTR très basse pour l'arsenic [356] et qui pose des questions de gestion assez similaires.

Enfin, les réflexions devront s'efforcer d'articuler ces aspects pratiques avec les principes généraux mis en avant par la Charte de l'environnement en France (*« Chacun a le droit de vivre dans un environnement équilibré et respectueux de la santé »* [1]) et par la Charte européenne de l'environnement et de la santé *(« Chaque personne est en droit de bénéficier d'un environnement permettant la réalisation du niveau le plus élevé possible de santé et de bien-être »* [5]).

Copies des travaux les plus importants

Au regard de la progression du parcours professionnel présentée dans le cadre de cette thèse en VAE, les travaux ci-dessous sont rangés par ordre chronologique croissant, et donc indirectement, selon les thèmes des travaux décrits dans la thèse.

1. Karr G, Boudet C, Le-Gall AC *et al*. Aide au choix de substances prioritaires en santé environnementale : un processus associant un avis d'expert et une analyse multicritère participative. *Environnement, Risques & Santé* 2014 ; 13(2) : 135-143. DOI : https://doi.org/10.1684/ers.2014.0686.
2. Karr G, Pecassou B, Boudet C et al. Aide au choix des substances prioritaires du futur Plan national santé environnement (PNSE3) : élaboration et mise en œuvre d'un indicateur de risque collectif. *Environnement, Risques & Santé* 2014 ; 13(3) : 232-243. DOI : https://doi.org/10.1684/ers.2014.0705.
3. Karr G, Nicolas M, Maupetit F et al. Cleaning product emissions and indoor built environments: Exposure and health risk assessments from experiments under realistic indoor conditions. *Building and Environment* 2021; 206 : 108384. DOI : https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108384.
4. Karr G, Quivet E, Ramel M et al. Sprays and diffusers as indoor air fresheners: Exposure and health risk assessment based on measurements under realistic indoor conditions. *Indoor Air* 2021; 00(1-11). DOI : https://doi.org/10.1111/ina.12923.
5. Karr G, Ramel M. Qualité de l'air intérieur et santé : quels sont les produits de consommation présentant les risques individuels les plus élevés ? *Environnement, Risques & Santé* 2021 ; 20(5) : 446-456. DOI : https://doi.org/10.1684/ers.2021.1588.
6. Karr G, Prete G, Duboc S et al. Management of links of interest in European Union expertise authorities dealing with plant protection products: comparative analysis and recommendations. *Environmental Sciences Europe* 2023; 35(1) : 96. DOI : https://doi.org/10.1186/s12302-023-00760-1.
7. Karr G, Bert V. Méthodologie pour encadrer l'usage de renaturation dans la gestion des sites et sols pollués : premier rapport d'étape. Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris), 2025. Ineris-213291- v2.0. https://www.ineris.fr/fr/methodologie-encadrer-usage-renaturation-gestion-sites-sols-pollues-premier-rapport-etape

L'article suivant est présenté et analysé à la section 2.B.

Karr G, Boudet C, Le-Gall AC et al. Aide au choix de substances prioritaires en santé environnementale : un processus associant un avis d'expert et une analyse multicritère participative. Environnement, Risques & Santé 2014 ; 13(2) : 135-143. DOI : https://doi.org/10.1684/ers.2014.0686.

Aide au choix de substances prioritaires en santé environnementale : un processus associant un avis d'expert et une analyse multicritère participative

Guillaume Karr
Céline Boudet
Anne Christine Le-Gall
Jean-Marc Brignon
Laurence Rouil
Martine Ramel

Ineris
Parc Technologique Alata
BP2
60 550 Verneuil en Halatte
France
<guillaume.karr@ineris.fr>
<celine.boudet@ineris.fr>
<anne-christine.le-gall@ineris.fr>
<jean-marc.brignon@ineris.fr>
<laurence.rouil@ineris.fr>
<martine.ramel@ineris.fr>

Tirés à part :
G. Karr

Copyright © 2021 John Libbey Eurotext. Téléchargé par PRENOM VAUDELIN le 15/10/2021.

doi: 10.1684/ers.2014.0686

Article reçu le 24 avril 2013,
accepté le 19 novembre 2013

Résumé. Identifier et hiérarchiser des substances préoccupantes est une tâche complexe, car la notion même de substance préoccupante revêt un sens différent selon les réglementations, les politiques publiques, les exercices de hiérarchisation existants ou les opinions individuelles. En termes d'actions publiques, le choix de substances prioritaires s'appuie généralement sur des ordres de substances construits sur la base d'un avis d'experts. Le processus décrit dans cet article propose de fournir, en complément, des ordres de substances basés sur des points de vue identifiés parmi d'autres acteurs de la décision : groupes de décideurs, représentants d'intérêts divers, personnes issues de la société civile, etc. Pour ce faire, le processus invite à mettre en œuvre des méthodes multicritères participatives. Ces méthodes permettent de structurer l'implication des différents acteurs, explicitent la logique sous-jacente de chaque ordre généré et s'adaptent aux données disponibles. Leur mise en œuvre auprès de parties prenantes a été réalisée dans d'autres exercices de hiérarchisation, portant sur des problématiques environnementales diverses. À notre connaissance, elle n'a pas encore été réalisée dans le cadre de la hiérarchisation de substances préoccupantes. En utilisant ce processus de hiérarchisation à l'occasion d'un choix de substances prioritaires, répondant à un objectif spécifique, les décideurs pourront éclairer et nourrir leurs réflexions en s'appuyant sur plusieurs ordres de substances, accompagnés de leur logique sous-jacente, plutôt que sur un ordre unique qui supposerait un consensus qui n'existe pas nécessairement. Ces différents ordres leur permettront, dans une certaine mesure, d'appréhender et de tenir compte de la diversité des points de vue pouvant être choisis pour répondre à l'objectif retenu. Ce processus peut s'adapter à tout type de contexte et d'objectif de hiérarchisation. Une application réalisée en 2012, pour appuyer le choix des substances prioritaires du futur Plan national santé environnement (PNSE3), permet d'illustrer chaque étape du processus dans cet article.

Mots clés : analyse multicritère participative ; hiérarchisation ; substances.

Abstract

Decision aid for the selection of priority substances in Environmental Health : Combining expert opinion and a participatory multicriteria analysis

Identifying and ranking substances of concern is a complex task, because the meaning of 'substance of concern' differs according to the specific regulation, public policy, ranking exercise, and individual opinion. In terms of public actions, the choice of priority substances is generally supported by rankings of substances constructed by experts. In this article we suggest a process that adds to this ranking others based on views identified among others involved in the decision process, including but not limited to groups of decision makers, stakeholders, and members of civil society. Participatory multicriteria methods may be used for this purpose. These methods structure the participatory approach and make explicit the underlying logic of each ranking generated; they can be

Pour citer cet article : Karr G, Boudet C, Le-Gall AC, Brignon JM, Rouil L, Ramel M. Aide au choix de substances prioritaires en Santé environnementale : un processus associant un avis d'expert et une analyse multicritère participative. *Environ Risque Sante* 2014 ; 13 : 135-43. doi : 10.1684/ers.2014.0686

adapted to the available data. These methods have been implemented with stakeholders in other ranking exercises, dealing with various environmental issues, but not yet, to our knowledge, for ranking substances of concern. Using this ranking process for choosing priority substances in light of a specific objective, decision-makers can illuminate and nourish their analyses with several different rankings, characterized by their underlying logic, rather than by a single ranking that presupposes a consensus that does not necessarily exist. These different rankings will enable them, to some extent, to understand and take into account the diversity of the viewpoints that can be selected to meet the objective. This process can be adapted to any type of context and objective. An application conducted in 2012, to support the choice of the priority substances of the future French Environmental Health National Action Plan (PNSE3), illustrates each step of the process.

Key words: *participatory multi-criteria analysis; ranking; substances.*

Copyright © 2021 John Libbey Eurotext. Téléchargé par PRENOM VAUDELIN le 15/10/2021.

Le deuxième Plan national santé environnement (PNSE2) décline les engagements issus du Grenelle de l'environnement en matière de santé environnement, pour la période 2009-2013. L'action 5 demande de définir une méthode d'identification et de hiérarchisation des substances toxiques les plus préoccupantes.

Le caractère préoccupant d'une substance ne relève pas d'une définition absolue ou consensuelle. Des significations différentes peuvent être observées parmi les actions de hiérarchisation existantes, les réglementations en vigueur, les politiques publiques en cours ou les opinions individuelles. Différents critères peuvent être mis en avant. Par exemple :
– le danger, comme dans l'interdiction de produits cancérogènes, mutagènes et reprotoxiques (CMR) 1 et 2 dans les matériaux de construction [1] ;
– le caractère *Persistant Bioaccumulable et Toxique* (PBT), comme dans l'interdiction de polluants organiques persistants (POP) requise par la convention de Stockholm [2] ;
– la protection de populations sensibles, comme dans l'interdiction du bisphénol A dans les biberons, afin de réduire le risque sanitaire pour les nourrissons [3] ;
– le risque individuel inacceptable, comme pour les actions de réduction des émissions de perchloroéthylène incluses au PNSE2 [4], dans le but de réduire le risque sanitaire des personnes habitant au-dessus d'une entreprise de nettoyage à sec.

Parfois, les critères utilisés et leurs échelles de mesure ne sont pas explicités.

Mettre en avant un critère de santé publique inviterait à hiérarchiser les substances selon le risque collectif associé [5], c'est-à-dire selon leur nombre de cas attribuables – décès, pathologies. Se focaliser sur le risque collectif des substances présente deux limites principales :
– la diversité des points de vue portant sur la signification d'une substance préoccupante n'est pas prise en compte ;
– certaines caractéristiques d'une substance pouvant être jugées préoccupantes ne sont pas aujourd'hui quantifiables en termes de cas attribuables. C'est par exemple le cas du caractère perturbateur endocrinien.

Dans ce contexte d'attentes multiples et de connaissances imparfaites, quelle aide peut être fournie aux décideurs pour appuyer leur choix de substances devant faire l'objet d'actions prioritaires ?

Les décideurs disposent généralement d'un unique point de vue, construit par des experts scientifiques et techniques, qui peut éventuellement être accompagné de commentaires de parties prenantes.

À notre connaissance, les travaux d'appui existants ne proposent pas d'ordres de substances (co-)construits par plusieurs types d'acteurs de la décision.

Matériel et méthode

La méthode de construction du processus objet de la présente publication, décrit au paragraphe *Résultats*, a compris trois étapes principales.

Analyse des listes de substances prioritaires existantes

Identifier et hiérarchiser des substances n'est pas un exercice nouveau : un recensement et une analyse des principaux travaux existants ont donc été réalisés [6]. Cette analyse a conclu notamment que :
– chaque exercice fournit un avis d'expert, uniquement, sous la forme :
- d'une liste hiérarchisée de substances, comme dans le cadre des travaux portant sur les substances prioritaires de la directive-cadre sur l'eau [7], ou
- d'un ensemble hiérarchisé de groupes de substances, comme dans le cadre des travaux de l'Observa-

Copyright © 2021 John Libbey Eurotext. Téléchargé par PRENOM VAUDELIN le 15/10/2021.

toire de la qualité de l'air intérieur (OQAI) sur les polluants de l'air intérieur [8], ou
- de propositions de substances candidates, dont les aspects préoccupants sont détaillés dans un dossier spécifique, comme dans le cadre du règlement REACH[1] portant sur la gestion des produits chimiques en Europe [9] ;

– quelques exercices comprennent une consultation de parties prenantes, portant sur les résultats obtenus. Par exemple, l'Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail ([Afsset], aujourd'hui intégrée dans l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail [Anses]) consulte la Commission des produits chimiques et biocides sur les résultats de certains de ses travaux de hiérarchisation [10]. Néanmoins, les parties prenantes ne participent pas à la hiérarchisation des substances en tant que telle ;
– les méthodes de construction de ces avis d'experts ne sont pas toujours explicitées.

Cette analyse montre également qu'un exercice de hiérarchisation de substances se déroule dans un contexte d'attentes multiples. La définition d'une *substance préoccupante devant faire l'objet d'actions prioritaires* dépend de l'objectif retenu[2] et du point de vue[3] que l'on considère pour y répondre.

Dans ce contexte, les décideurs pourraient trouver utile de pouvoir s'appuyer sur plusieurs ordres de substances, correspondant à plusieurs points de vue explicites, notamment construits avec des acteurs qui ne soient pas des experts. Pour ce faire, différentes méthodes peuvent être mises en œuvre.

Recensement et analyse des méthodes multicritères utilisées comme aide à la décision

Une *méthode d'analyse multicritère*, ou plus simplement une *méthode multicritère*, est un ensemble de règles systématiques permettant, à partir d'un certain nombre de critères prédéfinis, de générer des éléments d'aide à la décision. Ces règles décrivent comment les informations fournies par chaque critère sont associées pour pouvoir comparer les objets de l'analyse. On parle de *synthèse* ou d'*agrégation*.

Un recensement et une analyse de ces méthodes ont donc également été réalisés [11]. Les deux types d'agrégation les plus utilisés sont :
– *le critère unique de synthèse*. Les critères sont combinés en un critère unique. Par exemple :
- une somme des scores de chaque critère est utilisée par l'IEH[4] pour hiérarchiser les substances devant faire l'objet d'actions de recherche prioritaires [12] ;
- une multiplication des scores de chaque critère a été utilisée par l'Anses pour hiérarchiser des substances reprotoxiques [13].

Ce type d'agrégation permet d'obtenir une liste complètement ordonnée. Il présuppose que les critères de hiérarchisation puissent s'exprimer en une même grandeur, ce qui peut s'avérer délicat[5] ;
– *le surclassement de synthèse*. Les substances sont comparées deux à deux, selon un système de règles appelé *relation de surclassement*. L'ensemble des résultats est synthétisé sous la forme d'un arbre ordonné de substances (*figure 1*).

Ce type d'agrégation a été par exemple utilisé dans le cadre du projet Sph'Air [14], afin de hiérarchiser des pesticides à surveiller dans l'air.

L'analyse effectuée montre que les méthodes d'agrégation par surclassement de synthèse offrent plusieurs avantages. Elles permettent notamment :
– de décrire finement les logiques de décision, par l'intermédiaire de poids entre critères, de seuils de veto, de seuils d'indifférence, de seuils de préférence, etc. [15] ;
– d'agréger des critères de nature différente (quantitatifs/qualitatifs), sans nécessairement les transformer au préalable en une même grandeur ;
– de considérer que deux substances peuvent être incomparables. Par exemple :
- si les substances S_1 et S_2 ont des profils de performances très différents sur l'ensemble des critères, sans qu'une dominance globale significative ne se dégage ;
- si S_1 domine faiblement S_2 pour une majorité de critères, mais que S_2 domine très fortement S_1 pour un nombre réduit de critères.

Cette notion d'incomparabilité se traduit graphiquement par l'absence de flèche entre deux substances situées à un même niveau vertical. Ainsi, dans la *figure 1*, le benzo[a]pyrène(B[a]P) et le phtalate de di-2-éthylhexyle (DEHP) sont considérés comme incomparables.

Un arbre contient donc plus d'informations qu'une liste hiérarchisée.

Cette richesse d'information peut rendre l'interprétation des résultats moins évidente que dans le cas d'un critère unique de synthèse. Elle permet néanmoins de

[1] *REACH: Registration, Evaluation, Authorization and restriction of Chemicals.*
[2] Compartiment environnemental et cible considérés, actions que l'on envisage d'entreprendre, types de substances considérées, etc.
[3] Représenté, en première approximation, par une sélection de critères pondérés. Cette sélection traduit une logique de décision sur laquelle on peut s'appuyer pour répondre à l'objectif retenu.
[4] (Medical Research Council) Institute for Environment and Health – Angleterre.
[5] En théorie et en pratique.

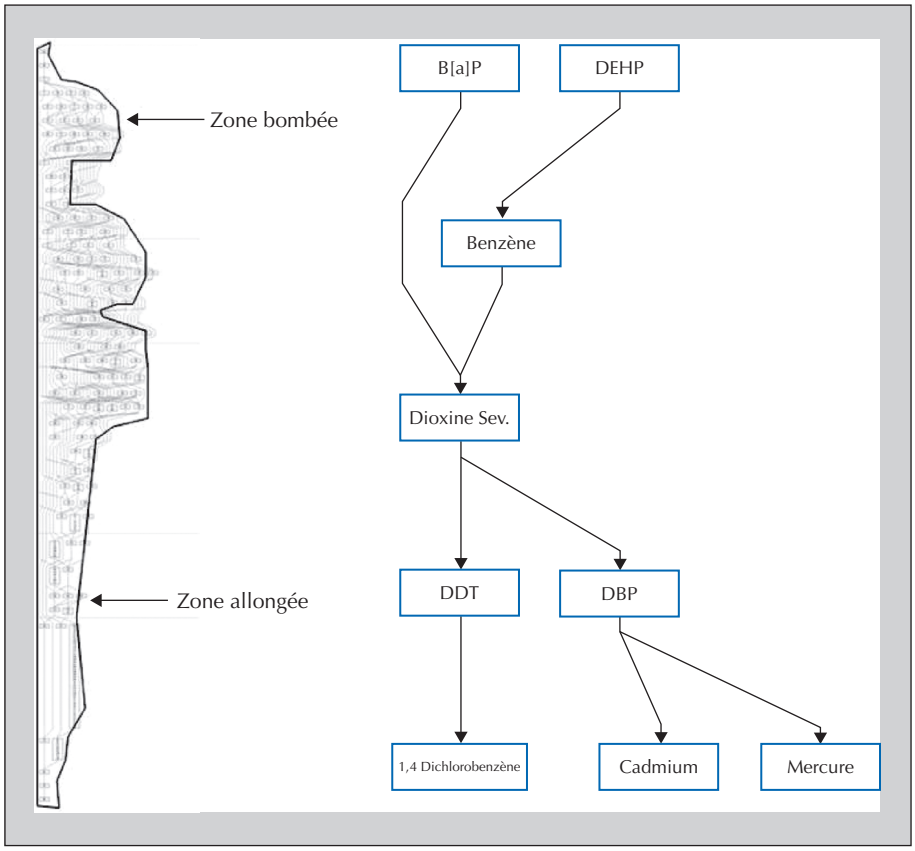


Figure 1. Exemple d'un arbre ordonné de substances, obtenu à l'aide d'une méthode multicritère utilisant une agrégation par surclassement de synthèse (ELECTRE III*) – profil de l'arbre complet (à gauche) et zoom sur la partie haute de l'arbre (à droite).

Figure 1. Example of an ordered tree of substances, generated with a multicriteria method using an outranking approach for rank aggregation – zoom to the top of the tree.

Chaque flèche entre deux substances représente une relation de surclassement. Par exemple, dans l'arbre de cette figure, le DEHP surclasse le benzène.
Un arbre de substances présente : des zones allongées, où la hiérarchie entre substances est prononcée ; des zones bombées, où la hiérarchie est moins prononcée : au sein d'une de ces zones, les substances ont un degré de préoccupation relativement proche les unes des autres.
*Méthode développée par le Lamsade (Laboratoire d'analyse et de modélisation de systèmes pour l'aide à la decision) - Université Paris-Dauphine.
Each arrow between two substances represents a hierarchical relation, in which the higher substance outranks the lower. For example, in the tree shown in this figure, DEHP outranks benzene.
A tree of substances comprises: elongated zones, where the ranking is quite marked; bulging zones, where ranking is less marked: in these groups of substances, the degrees of concern are rather close to one another.
* Method developed by the Lamsade (Laboratoire d'analyse et de modélisation de systèmes pour l'aide à la décision) - Université Paris-Dauphine.

favoriser les échanges entre les différents acteurs de la décision.

Les méthodes multicritères ont déjà été utilisées pour encadrer des démarches participatives associant des parties prenantes, lors de travaux de hiérarchisation portant sur des problématiques environnementales diverses – anciennes zones minières risquant de s'effondrer [16], gestion d'un territoire en cas de contamination radiologique accidentelle [17], réglementation des nanotechnologies [18], réhabilitation de milieux aquatiques pollués [19], répartition de la ressource en eau [20], politique énergétique [21], etc. – mais pas encore, à notre connaissance, dans le cas particulier de la hiérarchisation de substances préoccupantes.

Implication de deux types d'acteurs

Le processus de hiérarchisation, décrit au paragraphe *Résultats*, a été construit en s'appuyant sur une démarche participative. Deux types d'acteurs ont été impliqués :
– des experts scientifiques et techniques, spécialisés dans les domaines de l'évaluation des risques et de l'aide à la décision, issus d'organismes de référence nationaux et internationaux : Haut conseil de santé publique (HCSP), Institut de veille sanitaire (InVS), Anses, Institut national de santé publique du Québec (INSPQ), OQAI, Laboratoire d'analyse et modélisation de systèmes pour l'aide à la décision (Lamsade), École centrale de Paris et Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris).

Copyright © 2021 John Libbey Eurotext. Téléchargé par PRENOM VAUDELIN le 15/10/2021.

Copyright © 2021 John Libbey Eurotext. Téléchargé par PRENOM VAUDELIN le 15/10/2021.

Une première version du processus leur a été soumise. Les experts ont été sollicités pour examiner la robustesse de certaines composantes et formuler des suggestions d'amélioration.
Les experts de l'Ineris ont notamment élaboré des critères de hiérarchisation, ainsi que les échelles de mesure associées.
– des parties prenantes, réparties en différents *collèges*, s'inspirant de ceux qui avaient été définis à l'occasion du Grenelle de l'environnement : *industriels, ONG/associations, élus, État, monde académique, et syndicats*.
Les parties prenantes ont contribué aux réflexions portant sur la construction du processus [22, 23] : compréhension par des personnes non impliquées, articulation des axes de travail envisagés, nécessité d'une démarche participative à chaque étape, intégration de la perception sociétale, positionnement en stricte aide à la décision, etc.

Résultats

Le présent paragraphe décrit les différentes composantes du processus d'identification et de hiérarchisation élaboré par l'Ineris.

Une application du processus a été réalisée en 2012 [24], pour aider à l'identification des substances prioritaires du futur Plan national santé environnement (PNSE3). L'objectif retenu consistait à répondre à la question : *Quelles sont les substances préoccupantes dont il faut réduire prioritairement les expositions ?* Cette application permet d'illustrer ici chacune des composantes du processus[6].

Le nombre de substances chimiques présentes sur le marché européen est estimé à environ 100 000 [25]. La première étape d'un exercice de hiérarchisation, réalisé dans le cadre de contraintes budgétaires et temporelles classiques, consiste donc à présélectionner un nombre de substances plus limité.

Le processus suggère que cet *Univers de substances* soit construit sur la base d'une combinaison de listes existantes, à définir en fonction de l'objectif de hiérarchisation retenu. Cette construction constitue la phase d'identification des substances les plus préoccupantes, préalable à leur hiérarchisation.

Par exemple, dans le cadre de l'exercice du PNSE3, trois types de listes existantes ont été retenus :
– des listes spécifiques à certains types de polluants : pesticides (liste de l'Observatoire des résidus de pesticides [ORP]), polluants organiques persistants (liste de la convention de Stockholm), substances CMR les plus problématiques identifiées par l'Afsset, etc. ;
– des listes spécifiques à certains milieux d'exposition : substances de la deuxième Étude de l'alimentation totale française (EAT 2, Anses) pour lesquelles le risque n'a pas pu être évalué comme non préoccupant, substances identifiées dans le cadre de la directive-cadre sur l'eau européenne, substances hiérarchisées par l'OQAI, etc. ;
– des listes génériques : substances ciblées par la loi américaine CERCLA, liste canadienne du programme *Le Défi*, liste australienne de l'Inventaire national des polluants (NPI), etc.

Dans un second temps, dans le cadre d'un objectif donné, le processus invite à fournir aux décideurs plusieurs ordres de substances, correspondant à différents points de vue sur ce qu'est une *substance préoccupante devant faire l'objet d'actions prioritaires*. Il s'articule autour de deux axes de travail complémentaires (figure 2) :

1. La réalisation d'une analyse multicritère participative.
Un ordre de substances correspond alors à une logique de décision particulière, un point de vue multicritère. Plusieurs ordres de substances peuvent donc potentiellement être générés.
Des points de vue multicritères peuvent être identifiés parmi plusieurs types d'acteurs de la décision : groupe de décideurs, représentants d'intérêts divers, personnes issues de la société civile, etc.
Par exemple, dans le cadre de l'exercice du PNSE3 :
– la méthode multicritère retenue a été ELECTRE III. Développée par le Lamsade, cette méthode se base sur une agrégation par surclassement de synthèse ;
– huit critères ont été retenus (*tableau 1*). Ces critères sont issus d'échanges avec les parties prenantes, sur la base d'une proposition initiale élaborée par des experts de l'Ineris. Leur échelle de mesure a été élaborée par un expert du domaine correspondant ;
– deux points de vue multicritères (*tableau 1*) ont été identifiés parmi un groupe de personnes issues de la société civile, de profils variés, en utilisant des techniques de *révélation des préférences*.
En première analyse, le point de vue P_1 mettrait en avant la notion de population fragile à protéger des pollutions humaines, alors que le point de vue P_2 semblerait plutôt mettre en avant l'ampleur de la population exposée, quelle que soit l'origine de la pollution.
2. La construction d'un indicateur de risque collectif (IRC).
Il s'agit ici de caractériser le risque collectif des substances considérées, à défaut d'en avoir une valeur exacte.
En première approximation, l'IRC matérialise un avis d'expert en matière de risque.
Classer les substances selon leur valeur respective d'IRC permet d'obtenir une liste hiérarchisée, monocritère, fondée sur la notion de risque collectif.

[6] L'objet de la présente publication est le processus de hiérarchisation : une analyse détaillée des résultats de l'application réalisée fera l'objet de publications spécifiques.

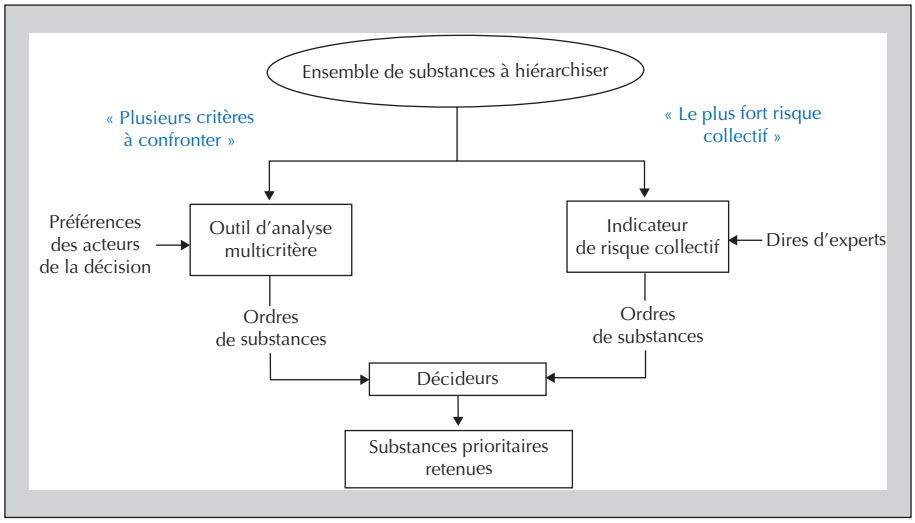


Figure 2. Schéma présentant l'approche double retenue pour le processus d'identification et de hiérarchisation de substances préoccupantes élaboré par l'Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris).

Figure 2. Diagram presenting the dual approach chosen for the process of identification and ranking of substances of concern elaborated by Ineris.

Tableau 1. Deux points de vue multicritères identifiés avec des parties prenantes, lors de l'exercice de hiérarchisation préparant le troisième Plan national santé environnement (PNSE3).

Table 1. Two multicriteria points of view identified with stakeholders, during the ranking exercise preparing the PNSE3 (third Environmental Health National Action Plan).

Critères	Sélections de poids	
	P_1 (%)	P_2 (%)
Sources anthropiques/naturelles	14	7
Dispersion de l'exposition	3	20
Enjeu groupe sensible	19	4
Risque pour l'environnement	8	9
Risque sanitaire	5	2
Permanence de l'imprégnation dans les milieux	5	11
Danger intrinsèque pour la santé	30	30
Coût et difficulté technique de la réduction des émissions	16	17

Par exemple, dans le cadre de l'exercice du PNSE3, la méthode de construction retenue pour l'IRC s'inspire de l'indicateur utilisé par *Eurostat* pour suivre l'efficacité de la mise en place du règlement REACH [26].

Ainsi, plusieurs ordres de substances sont générés (*figure 2*), à l'aide de deux méthodes de nature différente : des ordres multicritères, basés sur des logiques sous-jacentes explicites, et un ordre monocritère, basé sur une logique de risque. Ces ordres partagent le même objectif mais y répondent de manière différente : ils constituent autant d'éléments permettant d'appuyer et de nourrir la réflexion des décideurs.

Dans le cadre de l'exercice du PNSE3, trois ordres ont été élaborés : deux par analyse multicritère et un par calcul d'IRC. En tête de ces ordres se trouvent des substances classiquement considérées comme préoccupantes[7] et d'autres qui le sont moins[8].

Trente-cinq substances sont communes aux 100 premiers rangs de ces trois ordres (*tableau 2*).

[7] Par exemple : mercure, dioxines, benzo(a)pyrene, polychlorobiphényles (PCB), pesticides classiques, benzène, DEHP, formaldéhyde, etc.

[8] Par exemple : 4,4-méthylènedianiline (MDA) ; 4-tert-butylphénol ; 2-nitrotoluène ; sulfite de sodium ; diméthoate, etc.

Copyright © 2021 John Libbey Eurotext. Téléchargé par PRENOM VAUDELIN le 15/10/2021.

Tableau 2. Substances communes aux 100 premiers rangs des trois ordres obtenus lors de l'exercice de hiérarchisation préparant le troisième Plan national santé environnement (PNSE3).

Table 2. Substances present among the first 100 rated in the three rankings generated during the ranking exercise preparing the PNSE3 (third Environmental Health National Action Plan).

Arsenic	Chloroforme	Dichloroéthane	Furannes	PCB
Benzène	Chlorure de vinyle	Dieldrine	Hexachlorobenzène	Plomb
Benzidine	Chrome VI	Dioxines	Hexachlorocyclohexane	Tétrachloroéthylène
Benzo(a)anthracène	DBP	Endosulfan	Isodrine	Tétrachlorure de carbone
Benzo(a)pyrène	DDT	Endrine	Mercure	Toxaphène
Butadiène	DEHP	Epichlorohydrine	Paraffines chlorées à chaîne courte (SCCP)	Trichloroéthylène
Cadmium	(1,2- 1,3- 1,4-) Dichlorobenzènes	Formaldéhyde	Paraffines chlorées à chaîne moyenne (MCCP)	Vinclozoline

Copyright © 2021 John Libbey Eurotext. Téléchargé par PRENOM VAUDELIN le 15/10/2021.

De plus, puisqu'un exercice de hiérarchisation s'appuie sur les données disponibles caractérisant les substances et leurs effets, le processus demande que soit définie une *note de qualité*. Il s'agit d'une mesure simple de la disponibilité et de la qualité des données utilisées pour hiérarchiser une substance.

Par exemple, dans le cadre de l'exercice du PNSE3, la note de qualité est une mesure de la présence de données pour la substance parmi une sélection de bases de référence.

Des indicateurs peuvent également être construits en complément des ordres générés, selon les besoins des décideurs. Par exemple, dans le cadre de l'exercice du PNSE3, un indicateur de perception sociétale a été construit. Il s'agit d'une mesure simple du niveau de préoccupation de la société, vis-à-vis de chaque substance et de ses effets. Il a été élaboré en se basant sur la présence de la substance dans une sélection de médias de référence.

Ces deux types d'informations supplémentaires sont proposés en complément des ordres de substances générés. Ils ne participent pas à la hiérarchisation des substances en tant que telle.

Enfin, le processus élaboré par l'Ineris propose que la déclinaison de chaque étape s'appuie sur une démarche participative, impliquant des experts en matière de risque et des parties prenantes. La participation des parties prenantes porte notamment sur :
– la complétude de l'univers de substances ;
– le choix des critères ;
– l'identification de points de vue multicritères – poids entre critères – en utilisant par exemple des techniques de révélation des préférences.
– la correspondance des résultats obtenus avec les attentes sociétales du moment.

Discussion

Ce processus constitue un mode de gestion de la complexité inhérente à un exercice de hiérarchisation appuyant une décision en matière de santé environnement : connaissances scientifiques imparfaites, diversité de points de vue, enjeux multiples, etc.

Son originalité consiste en :
– l'intégration de différents types d'expertises : évaluation des risques, technico-économie, aide multicritère à la décision, ingénierie de la participation, etc. ;
– le couplage de méthodes, d'outils et de données existants et validés par ailleurs ;
– l'application de méthodes multicritères participatives auprès de parties prenantes, pour compléter un avis d'experts en matière de risque.

Les méthodes multicritères présentent les avantages suivants :
– elles donnent un cadre formalisé pour la démarche participative : formulation de la problématique, favorisation des échanges contradictoires, révélation et prise en compte des préférences exprimées par les participants, etc. ;
– un ordre de substances peut être généré pour chaque point de vue multicritère considéré, c'est-à-dire pour chaque logique de décision retenue. Ces méthodes permettent donc de fournir aux décideurs des ordres de substances accompagnés de leur logique sous-jacente explicite, ce qui assure la transparence de l'aide à la décision ;
– les points de vue multicritères retenus peuvent être co-construits avec plusieurs types d'acteurs de la décision, ce qui donne de la légitimité aux résultats obtenus, en complément de leur validité technique ;

– les échelles de mesure des critères peuvent s'adapter aux données disponibles : l'ensemble des aspects préoccupants d'une substance peut donc potentiellement être pris en compte, en s'adaptant au niveau de connaissances scientifiques du moment.

Le processus élaboré par l'Ineris propose d'appliquer ces méthodes dans le cas particulier de la hiérarchisation de substances préoccupantes, pour la première fois.

Dans un contexte d'enjeux multiples et de connaissances imparfaites, les décideurs disposent ainsi :
– avant de faire leur choix, d'une formalisation de plusieurs points de vue qui permet, dans une certaine mesure, d'appréhender la diversité des points de vue pouvant être choisis pour répondre à l'objectif retenu [27] ;
– une fois le choix effectué, d'éléments explicites et construits de manière transparente, permettant de justifier les raisons de leurs choix, et donc de leur donner plus de cohérence et de robustesse.

Fournir des avis complémentaires à des avis d'experts peut paraître ajouter trop de subjectivité dans l'aide à la décision. Néanmoins :
– les décideurs peuvent trouver utile de pouvoir appuyer leur décision sur des aides comportant une part de subjectivité bien explicitée, lorsqu'il n'existe pas de vérité scientifique sur le sujet étudié ;
– la plupart des évaluations comportent, implicitement ou explicitement, une part de subjectivité. Par exemple : le choix du taux d'escompte dans une analyse coût/bénéfice ou le choix des scénarios d'exposition dans une évaluation de risque. S'il est difficile d'être complètement objectif dans une évaluation, alors l'évaluateur doit plutôt s'attacher à expliciter les étapes où de la subjectivité intervient, ainsi que son influence sur les résultats obtenus.

La note de qualité permet d'apprécier la fiabilité du rang obtenu pour une substance dans un ordre. Elle peut également être utilisée pour établir des priorités d'actions de recherche.

L'indicateur de perception sociétale renseigne sur le contexte sociétal lié à la substance. En particulier, si une substance est considérée comme hautement préoccupante par la société, à tort ou à raison du strict point de vue de l'évaluation des risques, on peut s'attendre à ce qu'une sélection de substances prioritaires ne comprenant pas cette substance soit fortement questionnée lors de sa publication.

Par exemple, dans le cadre de l'exercice du PNSE3, le bisphénol A ne se trouve pas dans le haut de la liste IRC[9], principalement parce que la capacité de perturbation endocrinienne ne peut pas aujourd'hui être traduite en termes de cas attribuables. Un indicateur de perception sociétale élevé permet néanmoins d'alerter le décideur.

Les différentes composantes du processus s'adaptent à tout contexte et objectif de hiérarchisation considéré : univers de substances, critères, poids des critères, méthode de construction de l'IRC, choix des acteurs à impliquer, etc.

La méthode permet également de mettre en synergie les actions de hiérarchisation existantes :
– leurs résultats peuvent être intégrés parmi les listes retenues pour construire l'univers de substances ;
– leurs critères explicites peuvent être réutilisés au sein de l'analyse multicritère.

Conclusion

Dans un contexte de connaissances imparfaites et de diversité de points de vue, le processus élaboré par l'Ineris propose d'éclairer la réflexion des décideurs en leur fournissant plusieurs ordres de substances, accompagnés de leur logique sous-jacente explicite. Il invite à s'appuyer, notamment, sur des méthodes multicritères participatives.

Ce processus peut s'adapter à tout type de contexte et d'objectif de hiérarchisation. Il peut donc être entièrement redécliné pour d'autres objectifs que celui du PNSE3, par exemple dans des contextes plus locaux.

Si une problématique est proche de celle du PNSE3, une réutilisation partielle et/ou une adaptation des résultats obtenus peut être envisagée. Par exemple, des ordres multicritères ont été générés en ne retenant que le potentiel de perturbation endocrinienne dans le critère *Danger pour la santé*. ■

Remerciements et autres mentions

Nous remercions les membres de la Commission d'orientation de la recherche et de l'expertise (CORE) de l'Ineris, pour leurs avis critiques et leurs suggestions d'amélioration ; les experts sollicités lors de la construction de la méthode, internes et externes à l'Ineris, Philippe Hubert tout particulièrement, pour leur appui technique ; le ministère en charge de l'Écologie, pour le financement de l'étude ; Myriam Merad, pour son aide précieuse tout au long du projet.

Financement : ministère en charge de l'Écologie ; **liens d'intérêts** : aucun.

[9] Mais il se trouve dans le haut des ordres générés par analyse multicritère.

Copyright © 2021 John Libbey Eurotext. Téléchargé par PRENOM VAUDELIN le 15/10/2021.

Copyright © 2021 John Libbey Eurotext. Téléchargé par PRENOM VAUDELIN le 15/10/2021.

Références

1. Arrêté du 28 mai 2009 modifiant l'arrêté du 30 avril 2009 relatif aux conditions de mise sur le marché des produits de construction et de décoration contenant des substances cancérigènes, mutagènes ou reprotoxiques de catégorie 1 ou 2. *Journal Officiel de la République Française* 2009, n° 0124 du 30 mai 2009, page 8940 - texte n° 12.

2. Convention de Stockholm sur les Polluants Organiques Persistants. Annexe D ; Informations Requises et Critères de Sélection. 22 mai 2001. http://www.pops.int/documents/convtext/convtext_fr.pdf.

3. Loi n° 2010-729 du 30 juin 2010 tendant à suspendre la commercialisation de biberons produits à base de bisphénol A. *Journal Officiel de la République Française*, n° 0150 du 1er juillet 2010, page 11857 ; texte n° 1.

4. Deuxième plan national santé environnement (PNSE2). http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/PNSE2.pdf

5. Hubert P. Pour un meilleur usage du risque attribuable en santé environnementale. *Environ Risque Sante* 2003 ; 2 : 266-78.

6. Grammont V, Boudet C. *Hiérarchisation des substances : identification des listes existantes de substances prioritaires*. Rapport N° DRC-09-104007-10463A. Verneuil-en-Halatte : Ineris, 2009. http://www.ineris.fr/centredoc/rapport-drc-09-104007-10463a-1352824865.pdf

7. Daginnus K, Gottardo S, Payá-Pérez A, Whitehouse P, Wilkinson H, Zaldívar JM. Model-Based Prioritisation Exercise for the European Water Framework Directive. *Int J Environ Res Public Health* 2011 ; 8 : 435-55.

8. Alméras C. *Hiérarchisation sanitaire des polluants de l'environnement intérieur : mise à jour pour le cas des logements et extrapolation à d'autres environnements intérieurs*. OQAI 2010, rapport n° ESE/Santé – 2010-095. Paris : OQAI, 2010.

9. Règlement (CE) n° 1907/2006. Procédure d'autorisation de REACH. (Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals). *Journal Officiel* L 136 du 29 mai 2007.

10. Avis de la Commission des produits chimiques et biocides du 22 juin 2009 relatif aux substances extrêmement préoccupantes à proposer par la France en vue d'une inclusion à l'annexe XIV des substances soumises à autorisation du règlement Reach. www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/avis_CPCB_SVHC_090622-2.pdf

11. Le Gall AC. *Panorama des méthodes d'analyse multicritère comme outils d'aide à la décision*. Rapport Ineris N° DRC-09-102861-12257A. Verneuil-en-Halatte : Ineris, 2009. http://www.ineris.fr/centredoc/le-gall-2009-drc-09-102861-12257a-mcda-action-18a-1352824541.pdf

12. *A Screening method for ranking chemicals by their fate and behaviour in the environment and potential toxic effects in humans following non-occupational exposure*. Bedford : MRC Institute for Environment and Health, 2004, Web Report W14. MRC Institute for Environment and Health, 2004. http://www.cranfield.ac.uk/health/researchareas/environmenthealth/ieh/ieh%20publications/w14.pdf

13. Bonvallot N, Mullot JU, Solal C, Dor F. Méthode d'identification et de hiérarchisation des substances reprotoxiques pour la construction de valeurs toxicologiques de référence. *Environ Risque Sante* 2009 ; 8 : 119-31. doi: 10.1684/ers.2009.0236.

14. L'Hermite N, Gouzy A. *Utilisation de l'outil Sph'Air pour déterminer les substances phytosanitaires à surveiller dans le compartiment aérien*. Rapport Ineris n° DRC-08-94291-16614A. Verneuil-en-Halatte : Ineris, 2008.

15. Roy B, Bouyssou D. *Aide multicritère à la décision : Méthodes et cas*. Paris : Economica, 1993.

16. Merad MM, Verdel T, Kouniali S, Roy B. *Méthodologie de hiérarchisation du risque d'effondrement minier sous bâti et infrastructures. Application au bassin ferrifère lorrain*. Colloque Après mine 2003, 5-7 février 2003, Nancy.

17. Parache V, Renaud P, *et al*. *Projet de recherche sur les indicateurs de la sensibilité radioécologique et les méthodes multicritères appliqués à l'environnement d'un site industriel*. Rapport scientifique DEI/SESURE/2010-12. Fontenay-aux-Roses : IRSN, 2010 ; http://www.irsn.fr/FR/Larecherche/publications-documentation/Publications_documentation/BDD_publi/DEI/Documents/PRIME-rapport-scientifique.pdf

18. Hansen SF. Multicriteria mapping of stakeholder preferences in regulating nanotechnology. *J Nanopart Res* 2010 ; 12 : 1959-70.

19. Linkov I, Welle P, Loney D, *et al*. Use of multicriteria decision analysis to support weight of evidence evaluation. *Risk Anal* 2011 ; 31 : 1211-25.

20. Messner F, Zwirner O, Karkuschke M. Participation in multicriteria decision support for the resolution of a water allocation problem in the Spree River basin. *Land Use Policy* 2006 ; 23 : 63-75.

21. Stagl S. Multicriteria evaluation and public participation : the case of UK energy policy. *Land Use Policy* 2006 ; 23 : 53-62.

22. Karr G, Boudet C, Bureau J. *Hiérarchisation de substances : définition d'une stratégie de hiérarchisation et mise en application sur un nombre limité de substances : premier rapport d'étape*. Rapport Ineris réf. DRC-10-109446-08589B. Verneuil-en-Halatte : Ineris, 2011.

23. Karr G, Boudet C, Ramel M. *Hiérarchisation de substances : définition d'une stratégie de hiérarchisation et mise en application sur un nombre limité de substances : second rapport d'étape*. Rapport Ineris réf. DRC-11-115712-00485B. Verneuil-en-Halatte : Ineris, 2011.

24. Karr G, Boudet C, Ramel M. *Définition d'une méthode d'identification et de hiérarchisation de substances préoccupantes. Application au cas particulier de la préparation du troisième Plan National Santé Environnement*. Rapport Ineris ref. DRC-12-125943-04682A Verneuil-en-Halatte : Ineris, 2013.

25. Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie (MEDDE). *REACH, une réglementation ambitieuse pour contrôler les produits chimiques*. Dossier de presse du MEDDE. Paris : MEDDE, 2006. http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/dossier_presse_Reach__13_dec_06.pdf - 2006

26. *The REACH baseline study - A tool to monitor the new EU policy on chemicals; REACH (Registration, Evaluation, Autorisation and restriction of Chemicals)*. Eurostat, 2009.

27. Stirling A. Keep it complex. *Nature* 2010 ; 468 : 1029-31.

L'article suivant est présenté et analysé à la section 2.B.

Karr G, Pecassou B, Boudet C et al. Aide au choix des substances prioritaires du futur Plan national santé environnement (PNSE3) : élaboration et mise en œuvre d'un indicateur de risque collectif. Environnement, Risques & Santé 2014 ; 13(3) : 232-243. DOI : https://doi.org/10.1684/ers.2014.0705.

Aide au choix des substances prioritaires du futur Plan national santé environnement (PNSE3) : élaboration et mise en œuvre d'un indicateur de risque collectif

Guillaume Karr
Bénédicte Pecassou
Céline Boudet
Martine Ramel

Ineris
Parc technologique Alata
BP2
60 550 Verneuil-en-Halatte
France
<guillaume.karr@ineris.fr>
<benedicte.pecassou@yahoo.fr>
<celine.boudet@ineris.fr>
<martine.ramel@ineris.fr>

Tirés à part :
G. Karr

Article reçu le 26 juillet 2013, accepté le 14 mars 2014

Résumé. Le troisième Plan national santé environnement (PNSE3) comprendra une liste de substances préoccupantes devant faire l'objet d'actions prioritaires. Les personnes en charge du choix de ces substances pourraient souhaiter baser leur décision, notamment, sur un critère de santé publique. Hiérarchiser des substances préoccupantes selon une logique de santé publique reviendrait à se focaliser sur leur risque collectif attribuable, c'est-à-dire sur le nombre de cas (décès et/ou pathologies) associés à leurs expositions respectives. Néanmoins, des données de risque collectif ne sont disponibles que pour très peu de substances. Un indicateur a donc été élaboré pour caractériser le risque collectif (IRC), à défaut d'en avoir une valeur exacte pour chaque substance considérée. Cet indicateur s'inspire de celui qu'utilise Eurostat pour suivre l'efficacité de la mise en œuvre du règlement REACh, en l'adaptant au contexte spécifique du PNSE. La méthode de construction de l'IRC et les détails de sa déclinaison pratique ont fait l'objet d'une démarche participative, impliquant des experts en matière de risque et des personnes issues de la société civile. Un IRC a été calculé pour plus de 300 substances. Les résultats ont permis : i) d'obtenir, pour la première fois en France, une liste hiérarchisée de substances basée sur une reconstruction simplifiée de risques collectifs ; ii) de distinguer environ 50 substances en tête de liste, qui peuvent en première analyse être considérées comme les plus préoccupantes, au regard de la logique de santé publique traduite par l'IRC. Dans le cadre de la préparation du PNSE3, une analyse multicritère a permis de générer des ordres de substances correspondant à d'autres logiques de décision, identifiées auprès de personnes issues de la société civile. La liste hiérarchisée IRC, en formalisant une logique de santé publique, fournit un éclairage différent et contribue ainsi à nourrir la réflexion des décideurs.

Mots clés : collectif ; hiérarchisation ; indicateur ; risque ; substance.

Abstract

Assistance for selecting the priority substances of the future French National Environment and Health Action Plan (Plan national santé environment – PNSE3): Developing and implementing a collective risk indicator

The third French National Environment and Health Action Plan (Plan national santé environment – PNSE3) will include a list of priority substances of concern. Those responsible for choosing these priority substances might well wish to base their decision on a public health criterion. Ranking substances of concern according to such a criterion implies focusing on their collective risk, measured by the number of deaths and/or diseases attributable to each. However, collective risk data are available for only a very few substances. Consequently, we built an indicator to characterize this collective risk (CRI)

Pour citer cet article : Karr G, Pecassou B, Boudet C, Ramel M. Aide au choix des substances prioritaires du futur Plan national santé environnement (PNSE3) : élaboration et mise en œuvre d'un indicateur de risque collectif. *Environ Risque Sante* 2014 ; 13 : 232-43. doi : 10.1684/ers.2014.0705

Copyright © 2021 John Libbey Eurotext. Téléchargé par PRENOM VAUDELIN le 15/10/2021.

doi: 10.1684/ers.2014.0705

without having an exact value for each substance. This indicator is based on the one used by Eurostat to monitor the effectiveness of the implementation of the REACh Regulation, adapted to the specific context of the PNSE3. The CRI construction method and the practical details of each step were reviewed in a participatory approach that included experts in risk and members of civil society. A CRI was calculated for more than 300 substances. The results made it possible to: i) obtain, for the first time in France, a prioritized list of substances based on a simplified construction of collective risks; ii) distinguish the approximately 50 substances on the top of the list, which can be considered on initial analysis as the substances of the greatest concern, under the CRI public health criterion. As part of the procedure for preparing the PNSE3, a multicriteria analysis allowed us to generate different rankings of substances corresponding to other criteria or bases of decision, identified by different groups of stakeholders. The CRI prioritized list formalizes a public health-based rationale, sheds light on these other points of view, and provides useful information for decision makers.

Key words: *collective; indicator; ranking; risk; substance.*

Copyright © 2021 John Libbey Eurotext. Téléchargé par PRENOM VAUDELIN le 15/10/2021.

L'Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris) a élaboré un processus général de hiérarchisation de substances, adaptable à différents contextes et à différents objectifs [1]. Dans le cadre de la préparation du PNSE3, ce processus a été mis en œuvre pour aider à identifier les substances devant faire l'objet d'actions prioritaires.

L'objectif de cet exercice était de répondre à la question : « *Quelles sont les substances préoccupantes dont il faut réduire prioritairement les expositions ?* », en se focalisant sur les risques chimiques de type chronique.

Le processus général de hiérarchisation associe la réalisation d'une analyse multicritère participative à l'élaboration d'un indicateur de risque. Le présent article porte sur la manière dont a été construit et mis en œuvre cet indicateur pour l'exercice du PNSE3.

Dans le cadre des contraintes temporelles et budgétaires de l'étude, l'indicateur se focalise sur la cible homme *via* environnement, c'est-à-dire sur l'être humain exposé aux substances présentes dans l'air qu'il respire, dans l'eau qu'il boit, dans les aliments qu'il mange, etc.

Hiérarchiser des substances selon une logique de santé publique reviendrait à considérer leur risque collectif attribuable, c'est-à-dire le nombre de cas[1] associés à leurs expositions respectives. Pourtant, le risque collectif n'est pas utilisé dans les exercices de hiérarchisation existants [2], notamment car :
– des données de risque collectif ne sont disponibles que pour très peu de substances [3] ;
– lorsque ces données existent, elles font souvent l'objet de débats [3, 4], portant par exemple sur leur méthode de construction, les inférences utilisées, l'appréciation des incertitudes, l'interaction entre les différents facteurs de maladies ou de décès, etc.

[1] Décès et/ou pathologies.

Dans ce contexte, un indicateur a été construit afin de caractériser le risque collectif (IRC), à défaut d'en avoir une valeur exacte pour chacune des substances considérées dans l'exercice.

Ces substances ont ensuite été rangées selon leur valeur respective d'IRC, générant ainsi une liste hiérarchisée basée sur la notion de risque collectif.

Construire un indicateur pour hiérarchiser des substances préoccupantes n'est pas un exercice nouveau. Ce type d'indicateur est généralement construit selon deux approches [2, 5] :
• par attribution de scores.
Plusieurs critères sont sélectionnés en fonction de :
– l'objectif de hiérarchisation retenu ;
– la logique choisie pour y répondre, qui peut être une logique de risque [6-8] ou non [9-11].

Une échelle de mesure est définie pour chaque critère. Ces échelles permettent d'attribuer un score à chaque substance pour chaque critère. Ces scores sont ensuite agrégés en un score total, par l'intermédiaire d'un algorithme, d'une matrice, de règles logiques, etc.
• par reconstruction du risque.
L'indicateur élaboré prend ici la forme d'un ratio entre une évaluation d'exposition et une évaluation de danger. La quantification de l'exposition s'appuie sur des mesures [12, 13] ou sur des résultats de modélisation [14, 15].

Ce dernier type d'indicateur reconstruit un risque individuel, qui peut être moyen, ou raisonnablement majorant, ou correspondre aux scénarios d'exposition les plus probables. Dans le cadre de l'exercice du PNSE3, comment élaborer un indicateur portant sur le risque collectif ?

Plusieurs indicateurs caractérisant le risque collectif ont été élaborés dans d'autres cadres que celui de l'identification de substances prioritaires.

Le présent article porte sur :
– l'adaptation d'un de ces indicateurs au contexte du PNSE3 ;
– la hiérarchisation des 319 substances sélectionnées pour l'exercice du PNSE3 [1], à l'aide de l'indicateur obtenu.

Matériel et méthode

Cette section présente le processus qui a permis d'élaborer la méthode de construction de l'IRC.

Recensement et analyse des principaux types d'indicateurs existants

Une recherche bibliographique a été menée pour identifier les principaux types d`indicateurs caractérisant le risque collectif associé aux substances chimiques.

Approche centrée sur un unique milieu d'exposition

Certains indicateurs se focalisent sur la concentration des substances dans un unique milieu d'exposition : le milieu contribuant le plus au risque total, dans leur contexte spécifique.

Par exemple, lors d'un projet de construction d'une infrastructure routière, le volet *Air et Santé* de l'étude d'impact peut inclure le calcul d'un indicateur d'exposition de la population à la pollution atmosphérique (IPP) [16].

Un modèle de dispersion simple permet d'obtenir une cartographie de concentrations à proximité de l'infrastructure, pour un ou plusieurs polluants traceurs du risque (NOx, benzène, etc.). L'IPP est la somme des concentrations de chaque maille du domaine d'étude, pondérées par le nombre de riverains de la maille. En considérant que les effets sanitaires augmentent avec les concentrations inhalées, l'IPP caractérise le risque collectif des populations exposées à la pollution d'origine routière.

Approche multimilieux s'appuyant sur des DALY

Certains indicateurs intègrent l'exposition provenant de différents milieux (eau, air, aliments), puis caractérisent le risque par un nombre d'années de vie perdue en bonne santé, exprimé en DALY[2]. Cette approche est notamment utilisée par certaines méthodes d'analyse de cycle de vie (ACV).

L'ACV évalue les impacts environnementaux et sanitaires de chaque étape du cycle de vie d'un produit, d'un service, d'un procédé, etc. Certaines méthodes d'ACV quantifient les effets sanitaires par des DALY : pour chacune des étapes du cycle de vie, les émissions de polluants sont transformées en DALY, par l'intermédiaire de facteurs de caractérisation. Ces facteurs dépendent de la substance considérée et du compartiment environnemental où a lieu l'émission (eau, air, sol). Ils sont calculés à partir de données toxicologiques et de modèles multimédias d'exposition [17, 18]

Approche multimilieux s'appuyant sur un ratio de risque pondéré

Certains indicateurs intègrent l'exposition provenant de différents milieux, puis caractérisent le risque collectif, en se basant sur un ratio de risque individuel pondéré par l'ampleur de la population exposée.

Par exemple, Eurostat[3] suit l'efficacité de la mise en œuvre du règlement REACh[4] à l'aide d'un système d'indicateurs de risque [19][5]. Un de ces indicateurs se focalise sur la cible homme *via* environnement.

Les données de mesures sont préférées aux résultats de modèles. Lorsque des données de mesures ne sont pas disponibles, le modèle multimédia *EUSES*[6] fournit une mesure simple de l'exposition moyenne à partir des émissions et/ou des usages recensés pour la substance considérée.

Les effets sont caractérisés préférentiellement par des valeurs de référence internationalement reconnues. Par exemple : les *Acceptable Daily Intakes* (ADI) de l'Organisation mondiale de la santé (OMS). Ces valeurs de référence étant disponibles en nombre limité, le calcul d'un substitut est proposé à défaut, sur la base des données disponibles. Par exemple : des NOAEL[7].

Le ratio de risque correspondant est multiplié par un poids caractérisant l'ampleur de la population exposée à la substance. Ce poids est déterminé par des règles de calcul simples, à partir du nombre de producteurs, des volumes de production, des types d'utilisation, etc.

Type d'indicateur retenu pour l'exercice du PNSE3

L'IRC de l'exercice du PNSE3 s'est inspiré de l'indicateur Eurostat, car cet indicateur permet :

[2] *Disability Adjusted Life Years* – DALY.

[3] Direction générale de la Commission européenne chargée de l'information statistique à l'échelle communautaire.

[4] *Registration, Evaluation, Authorisation and restriction of Chemicals* : enregistrement, évaluation et autorisation des produits chimiques - réglementation européenne sur les produits chimiques.

[5] L'Ineris a participé à l'élaboration de ce système.

[6] *European Union System for the Evaluation of Substances* est un modèle dont le développement a été réalisé par l'Union européenne (DGXI, ECB, etc.). EUSES s'appuie sur les paramètres et les méthodes du *Technical Guidance Document*.

[7] *No Observed Adverse Effect Level* : dose maximale sans effet néfaste observé.

Copyright © 2021 John Libbey Eurotext. Téléchargé par PRENOM VAUDELIN le 15/10/2021.

Tableau 1. Sources de données retenues pour caractériser les émissions dans l'environnement, la contamination des milieux et les expositions liées aux substances sélectionnées pour l'exercice de hiérarchisation du PNSE3.

Table 1. Data sources chosen for characterizing environmental emissions, contamination of environmental compartments and exposures due to the substances selected for the PNSE3 ranking exercise.

Milieux	Sources de données	
	Émissions	État des milieux - Expositions
Air	• Registre français des émissions polluantes (IREP) • Centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique (Citepa)	• Inventaire des données de bruit de fond (Ineris) • Campagne de mesures dans les logements (OQAI) • Fiches de données toxicologiques et environnementales (Ineris)
Eau	• Registre français des émissions polluantes (Irep) • Guide pratique des substances toxiques dans les eaux douces et littorales - Agence de l'eau Seine Normandie (AESN) • Programme *Recherche des substances dangereuses dans l'eau* (RSDE)	• Agences de l'eau • Fiches de données toxicologiques et environnementales (Ineris) • Deuxième étude de l'alimentation totale française 2 (EAT 2)
Sol	• Registre français des émissions polluantes (Irep) • Banque nationale des ventes pour les distributeurs (BNVD) • Service de l'Observation et des statistiques (SOeS)	• Réseau de mesures de la qualité des sols (RMQS)
Aliments	-	• Deuxième étude de l'alimentation totale française 2 (EAT 2)

Ineris : Institut national de l'environnement industriel et des risques ; OQAI : Observatoire de la qualité de l'air intérieur.

– de prendre en compte l'ensemble des voies d'exposition, en s'appuyant sur un modèle multimédia (EUSES) classiquement utilisé par les évaluateurs de risque en Europe ;
– d'intégrer les effets sanitaires à seuil et sans seuil ;
– de faire un calcul pour chacune des 319 substances sélectionnées pour l'exercice du PNSE3 [1], tout en respectant les contraintes de temps de l'étude.

Parmi les indicateurs recensés, l'IPP présente la caractérisation la plus fine de la population exposée. Son utilisation est bien adaptée à des contextes locaux.

Néanmoins, pour être utilisé dans le cadre de l'exercice du PNSE3, l'IPP aurait dû être extrapolé à l'ensemble des autres milieux d'exposition (eau, sol, aliments). La cartographie de la contamination des milieux aurait également dû être étendue à l'échelle nationale, ce qui représente un travail lourd, en cours de développement dans d'autres cadres [20].

Les facteurs de caractérisation de l'ACV auraient pu être appliqués aux données d'émissions disponibles pour les substances de l'exercice du PNSE3. Ces facteurs présentent l'avantage de tenir compte de la gravité des effets sanitaires des substances considérées. Néanmoins, pour des raisons pragmatiques, leur calcul repose notamment sur l'hypothèse d'une absence de seuil d'effet[8] pour toutes les substances, hypothèse qui ne correspond pas aux pratiques classiques actuelles de l'évaluation des risques.

[8] L'absence d'effet ne peut provenir que d'une absence d'émission.

Adaptation au cas particulier du PNSE3

La méthode de construction de l'indicateur Eurostat est adaptée au contexte européen du règlement REACh. Plusieurs composantes ont donc été retravaillées en fonction du contexte national du PNSE3 [1], notamment :
– les paramètres de modélisation correspondent aux caractéristiques du territoire métropolitain : surface totale, part d'eaux de surface, etc.
– les données d'émissions, de contamination des milieux et d'expositions ont été extraites de différents recensements français de référence (*tableau 1*), afin de bénéficier de données de qualité et représentatives de la situation française ;
– les substances faisant l'objet d'un calcul d'indicateur sont celles qui ont été sélectionnées pour l'exercice du PNSE3 (*tableau 2* [1]).

Mise en œuvre d'une démarche participative

La méthode de construction de l'IRC, décrite au paragraphe Résultats, a été élaborée en s'appuyant sur une démarche participative. Deux types d'acteurs ont été impliqués :
• des parties prenantes, réparties en différents collèges s'inspirant de ceux qui avaient été définis à l'occasion du Grenelle de l'environnement : industriels, ONG/associations, élus, État, monde académique et syndicats.
Une première version de la méthode de construction leur a été soumise, pour avis.

Copyright © 2021 John Libbey Eurotext. Téléchargé par PRENOM VAUDELIN le 15/10/2021.

• des experts scientifiques et techniques, spécialisés dans les domaines de l'évaluation des risques, issus d'organismes de référence nationaux et internationaux : HCSP[9], InVS[10], Anses[11], INSPQ[12], OQAI[13] et Ineris.
La méthode de construction, mise à jour suite aux échanges avec les parties prenantes, leur a été soumise pour avis.
L'exercice du PNSE3 a été réalisé avec la méthode mise à jour suite à ces échanges.

Résultats

Ce paragraphe présente :
– la méthode de construction élaborée pour l'IRC ;
– la hiérarchisation des 319 substances de l'exercice du PNSE3, réalisée avec l'IRC.

Méthode de construction de l'IRC

La méthode de construction de l'IRC décline les étapes du schéma conceptuel d'évaluation des risques, pour une exposition moyenne dans la population française, de manière systématique pour chaque substance (*figure 1*).

Les principes d'un calcul d'IRC sont résumés ci-dessous. Les détails pratiques de chaque étape du calcul sont fournis par ailleurs [1].
• *Caractérisation des expositions moyennes par ingestion ($Dose_{ing}$) et par inhalation ($Dose_{inh}$).*
Si des données de mesures d'exposition sont disponibles, elles sont retenues en priorité. À défaut, l'exposition moyenne est modélisée avec le logiciel EUSES.
Si des données de contamination des milieux environnementaux sont disponibles pour la substance considérée (*tableau 1*), elles sont intégrées au niveau des calculs intermédiaires de EUSES.
• *Caractérisation des dangers pour les voies ingestion ($Dose_{tox\ ing}$) et inhalation ($Dose_{tox\ inh}$).*
Pour chaque voie, le danger est caractérisé préférentiellement par une valeur toxicologique de référence (VTR) de la substance. Si besoin, un choix entre les différentes VTR existantes est effectué, en suivant les avis publiés par l'Anses et l'Ineris, ou à défaut en appliquant les recommandations de la Direction générale de la Santé[14]. À défaut, une VTR de substitution est construite à partir d'autres types d'informations - NOAEL, LOAEL[15], VLEP[16], phrases de risque[17], etc. – en y appliquant des facteurs de sécurité.
• *Caractérisation de l'ampleur de la population exposée à la substance.*
Cette ampleur est caractérisée par un poids (P_{exp}), dont les valeurs se répartissent entre 0 – personne n'est exposé – et 10 – l'ensemble de la population est exposé. Pour chaque substance, P_{exp} est calculé par un système simple d'attribution de scores, à partir de ses niveaux d'émission dans l'environnement, des types d'usage (*cf.* descripteurs du règlement REACh), de sa capacité de propagation (demi-vies dans l'air et dans l'eau) et de sa présence mesurée dans les milieux d'exposition.
• *Caractérisation du risque collectif.*
L'IRI est calculé sur la base des expositions et des dangers obtenus. Puis il est multiplié par P_{exp} pour obtenir l'IRC, qui caractérise le risque collectif lié à la substance.

Les parties prenantes et les experts ont formulé des avis et fait des propositions portant sur différents aspects [21] : détail des règles pratiques proposées, intégration de la perception sociétale, identification des substances pour lesquelles les données nécessaires sont partielles/lacunaires, etc.

Ces avis et propositions ont participé à l'élaboration de la méthode de construction de l'IRC. Par exemple, deux informations complémentaires ont été construites pour les décideurs :
• une note de qualité (NQ) caractérise la disponibilité et la qualité des données utilisées pour calculer l'IRC d'une substance. Une NQ élevée correspond à une substance qui fait l'objet de nombreuses données, issues de bases reconnues.
La NQ est calculée par des règles simples d'attribution de scores :
– d'autant plus élevés que les données utilisées correspondent aux données préférentielles identifiées. Par exemple : VTR, mesures dans les milieux d'exposition, etc. ;
– d'autant plus faibles que les données utilisées ont été reconstruites à partir d'autres informations. Par exemple : substitut calculé à partir d'une NOAEL, exposition calculée avec EUSES, etc.
À titre d'illustration, la NQ du trichloroéthylène est de 9,75/10, celle du méthylisothiazolinone est de 0,5/10.
La NQ est considérée comme partie intégrante de la méthode, un attribut nécessaire à l'IRC ;

[9] Haut conseil de santé publique.
[10] Institut de veille sanitaire.
[11] Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail.
[12] Institut national de santé publique du Québec.
[13] Observatoire de la qualité de l'air intérieur.
[14] Circulaire n°DGS/SD7B/2006/234.

[15] *Lowest Observed Adverse Effect Level* : dose minimale à partir de laquelle un effet néfaste est observé.
[16] Valeur limite d'exposition professionnelle, calculée sur la base d'une exposition d'une vie de travail composée de journées de 8 heures.
[17] Phrases types décrivant les risques associés à l'utilisation d'une substance ou d'un produit chimique. Ces phrases de risque sont représentées par des sigles sur l'étiquetage réglementaire des produits chimiques.

Copyright © 2021 John Libbey Eurotext. Téléchargé par PRENOM VAUDELIN le 15/10/2021.

Copyright © 2021 John Libbey Eurotext. Téléchargé par PRENOM VAUDELIN le 15/10/2021.

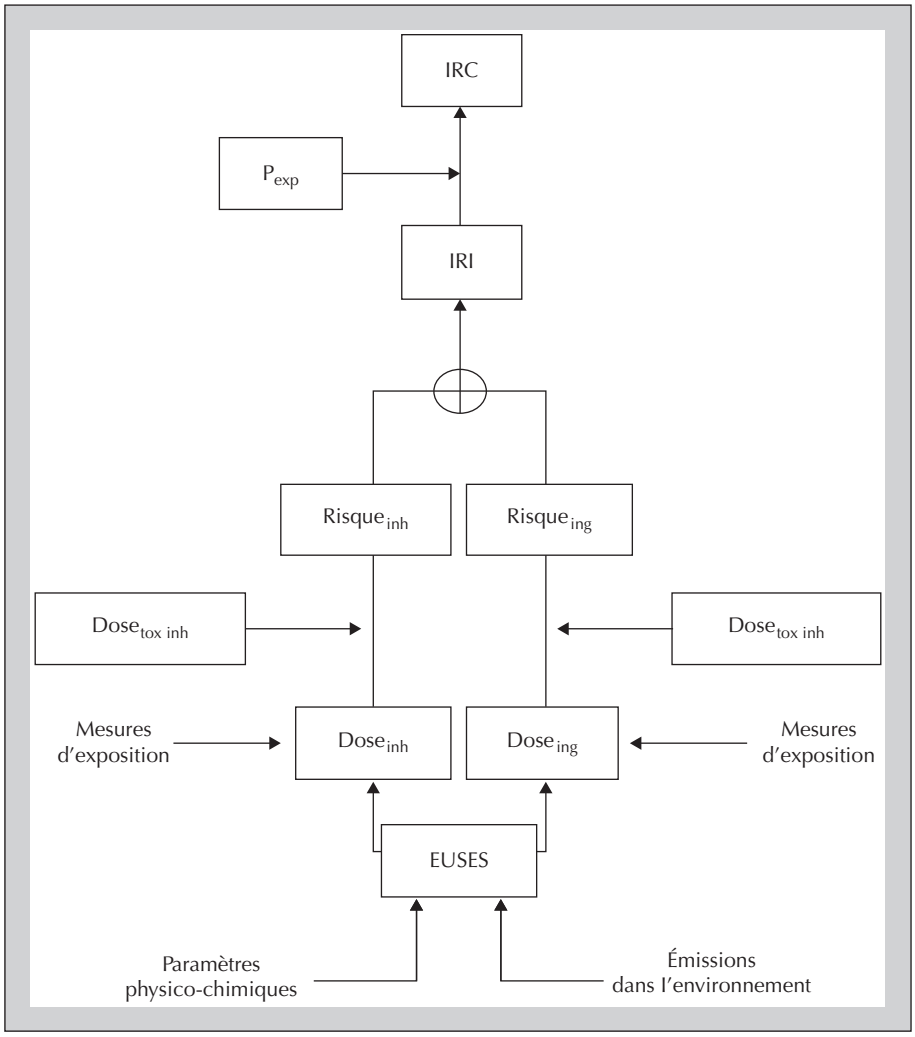


Figure 1. Principes de construction de l'indicateur de risque collectif (IRC) de l'exercice du PNSE3.

Figure 1. Principles underlying the construction of the IRC (collective risk indicator) of the PNSE3 ranking exercise.

Pour une substance donnée :
$Dose_{ing}$ et $Dose_{inh}$ (mg/kg_{pc}/j) sont respectivement la dose d'exposition moyenne pour la voie ingestion et pour la voie inhalation*.
$Dose_{tox\ ing}$ et $Dose_{tox\ inh}$ (mg/kg_{pc}/j) sont respectivement une dose toxique de référence** pour la voie ingestion et pour la voie inhalation.
$Risque_{ing}$ et $Risque_{inh}$ sont respectivement le risque moyen pour la voie ingestion et pour la voie inhalation, rapport entre $Dose_{ing}$ et $Dose_{tox\ ing}$ ainsi qu'entre $Dose_{inh}$ et $Dose_{tox\ inh}$.
IRI est l'indicateur de risque individuel moyen, défini comme la somme*** de $Risque_{ing}$ et $Risque_{inh}$;
P_{exp} (sans unité) est un poids caractérisant l'ampleur de la population exposée à la substance considérée.
IRC est l'indicateur de risque collectif, défini comme le produit entre IRI et P_{exp}.
* Déduite de la concentration d'inhalation moyenne, à l'aide d'un poids moyen et d'un débit d'inhalation moyen.
** La dose toxique de référence des effets sans seuil correspond à la dose associée à un excès de risque de 10^{-5}.
*** Quels que soient les effets critiques.
For a given substance:
$Dose_{ing}$ and $Dose_{inh}$ ($mg.kg_{bw}$-1.d-1) are the average exposure doses for, respectively, the ingestion and inhalation routes.
$Dose_{tox\ Ing}$ and $Dose_{tox\ inh}$ ($mg.kg_{bw}$-1.d-1) are toxic reference doses for, respectively, the ingestion and inhalation routes.
$Risque_{ing}$ and $Risque_{inh}$ are the average risks for, respectively, the ingestion and inhalation routes, that is the ratios of $Dose_{ing}$ to $Dose_{tox\ ing}$ and of $Dose_{inh}$ to $Dose_{tox\ inh}$.
IRI is the average Individual Risk Indicator, defined as the sum of $Risque_{ing}$ and $Risque_{inh}$.
P_{exp} (no unit) is a weight characterizing the proportion of the population exposed to the substance.
IRC is the Collective Risk Indicator, defined as the product of IRI and Pexp.

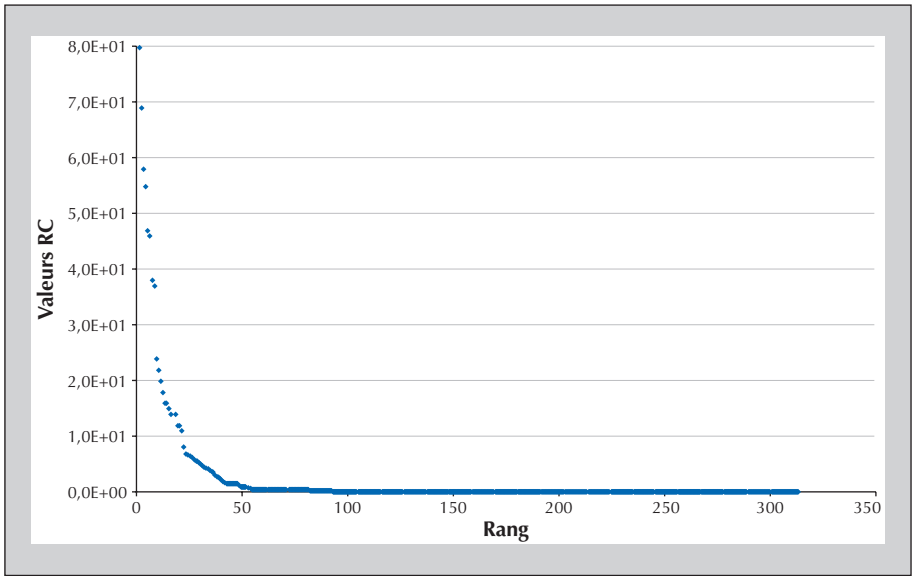


Figure 2. Distribution des indicateurs de risque collectif (IRC) calculés lors de l'exercice du PNSE3.

Figure 2. Distribution of the IRC (collective risk indicator) calculated for the PNSE3 ranking exercise.

Copyright © 2021 John Libbey Eurotext. Téléchargé par PRENOM VAUDELIN le 15/10/2021.

• un indicateur de perception sociétale (IPS) caractérise le degré de préoccupation de la société vis-à-vis de la substance et de ses effets. Dans le cadre de l'exercice du PNSE3, l'IPS d'une substance consiste en une caractérisation de la présence d'informations portant sur la thématique santé environnement et mentionnant le nom de la substance, publiées en direction du grand public, sur les sites Internet d'une sélection de différents types d'organismes d'information : télévision, journaux, ONG, associations, sites Internet d'information, etc. [1] Plus la substance est mentionnée dans ces sources d'informations, plus l'IPS est élevé.
À titre d'illustration, l'IPS du bisphénol A est de 9,5/10, celui du chloropropène est de 1/10.

Par ailleurs, dans le cadre des contraintes de temps de l'exercice du PNSE3, hiérarchiser plus de 300 substances présupposait l'utilisation de données bancarisées, présentes au sein de bases de données reconnues.

Pour certaines de ces substances, des informations supplémentaires existaient dans la bibliographie mais ne faisaient pourtant pas partie des bases de données existantes. Afin d'assurer un traitement systématique pour chaque substance, les informations présentes dans la bibliographie n'ont pas été utilisées.

Hiérarchisation basée sur l'IRC

Un calcul d'IRC, de NQ et d'IPS a été réalisé pour les 319 substances de l'exercice du PNSE3 (*tableau 2* [1]).

Les IRC calculés se répartissent entre 80 et 0 (*figure 2*). Leur médiane est égale à $9{,}3.10^{-4}$. Cent soixante-quinze (175) substances ont un IRC inférieur à 0,001 ; 91 substances ont un IRC supérieur à 0,1 et 49 substances ont un IRC supérieur à 1.

Certaines substances ne font pas partie du domaine de validité de EUSES[18]. Lorsque des données de mesures représentatives n'étaient pas disponibles dans les bases de données sélectionnées, un IRC n'a pas pu être calculé. C'est le cas pour 9 substances.

Ces substances ont donc été extraites de la liste hiérarchisée finale. Elles sont présentées aux décideurs à titre d'information. Par exemple : silices (BPD), bore, acide perchlorique, etc.

Discussion

À notre connaissance cette liste est, en France, la première liste hiérarchisée de substances basée sur une reconstruction simplifiée du risque collectif.

Une cinquantaine de substances se distinguent graphiquement du reste de l'univers (*figure 2*) comme ayant un IRC significativement supérieur à 0. Ces

[18] EUSES calcule la répartition d'une substance dans les différents milieux grâce à son log Kow. Or ce paramètre n'est pas mesurable pour les substances inorganiques.

Tableau 2. Substances sélectionnées pour l'exercice de hiérarchisation du PNSE3, rangées selon leur valeur d'IRC, accompagnées de leur note de qualité (NQ) et de leur indicateur de perception sociétale (IPS) – haut de la liste obtenue*.

Table 2. Substances selected for the PNSE3 ranking exercise, ordered by their IRC (collective risk indicator) value, accompanied by their quality score (note de qualité - NQ) and their societal perception indicator (indicateur de perception sociétale - IPS) – top of the list thus obtained.

Rang	Substances	IRC	NQ (/10)	IPS (/10)
1	2,3',4,4',5-PeCB (PCB 118) DL	8,0E+01	6,5	6
2	3,3',4,4'-TeCB (PCB 77) DL	6,9E+01	6,5	5
3	PCDD : 1,2,3,4,7,8-hexaCDD	5,8E+01	7,05	4,75
4	3,3',4,4',5,5HxCB (PCB 169) DL	5,5E+01	6,5	5,5
5	PCDdioxine : 2,3,7,8-tétraCDD	4,7E+01	7,05	4,75
6	Phtalate de bis(2-éthylhexyle) (DEHP)	4,6E+01	9,25	7,5
7	PCDFurannes : OctaCDF	3,8E+01	7,05	3,25
8	1,3-Butadiène	3,7E+01	8,5	3
9	Acétaldéhyde	2,4E+01	9	5,5
10	Benzidine	2,2E+01	6,3	3,5
11	PCDD : 1,2,3,4,6,7,8-heptaCDD	2,0E+01	6,8	4,75
12	Formaldéhyde	1,8E+01	9,25	7,5
13	Hexachlorobutadiène	1,6E+01	7,9	2,5
14	PCDFurannes : 1,2,3,4,7,8-HxCDF	1,6E+01	7,3	4,25
15	Trichloroéthylène	1,5E+01	9,75	6
16	Chlorobenzène	1,4E+01	9	4,5
17	Nickel et ses composés	1,4E+01	10	8,75
18	Chrome (VI), composés du	1,4E+01	6,75	7,25
19	Benzène	1,2E+01	9,5	6,25
20	Acroléine	1,2E+01	9	4,5
21	Cadmium et ses composés	1,1E+01	10	10
22	PCDD : 1,2,3,7,8-pentaCDD	8,2E+00	5,5	4,75
23	Éthylbenzène	6,9E+00	8,75	5,5
24	2,3,3',4,4',5-HxCB (PCB 156) DL	6,8E+00	6,5	6
25	PCDD : octaCDD	6,6E+00	7,65	4,75
26	Benzo(a)pyrène	6,3E+00	9	5,75
27	1,2,3-Trichloropropane	5,9E+00	7	3
28	Dieldrine	5,7E+00	9,25	6,5
29	Arsenic inorganique et ses composés	5,4E+00	9,75	7,25
30	Mercure et ses composés	5,0E+00	10	9,75
31	Acide 4-chloro-o-tolyloxyacétique (2,4 MCPA)	4,7E+00	8,15	5
32	Plomb et ses composés	4,4E+00	9,25	9,75
33	Acrylamide	4,2E+00	8	9
34	Manganèse	4,1E+00	9,5	7
35	Zinc et composés	3,8E+00	10	9
36	Dioxyde de soufre	3,6E+00	8,25	7
37	Diméthoate	3,1E+00	8,75	6,75
38	Aluminium et composés	2,8E+00	9,5	8,5
39	Heptachlore (dont heptachlore époxyde)	2,7E+00	7,5	6
40	Cuivre	2,2E+00	9	9,25
41	PCDFurannes : 2,3,4,7,8-PeCDF	1,9E+00	6,75	3,75
42	Tétrachloroéthane (1,1,2,2-)	1,6E+00	8,75	2,5
43	Vanadium	1,5E+00	9,25	5,5
44	Disulfoton	1,5E+00	7,25	6,25

(*Continued*)

Copyright © 2021 John Libbey Eurotext. Téléchargé par PRENOM VAUDELIN le 15/10/2021.

Tableau 2. (*Suite*)

Rang	Substances	IRC	NQ (/10)	IPS (/10)
45	PCDFurannes : 1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	1,5E+00	7,35	3,75
46	Sulfite de sodium	1,4E+00	6,5	4
47	PCDFurannes : 2,3,7,8-TeCDF	1,4E+00	6,75	3,75
48	Cobalt	1,3E+00	9,5	7
49	Dibenzo(a,h)anthracène	1,1E+00	9	5,25
50	1,1,2-Trichloroéthane	9,3E-01	8,65	4
51	Tétrachlorure de carbone	9,1E-01	9	3
52	Benzo(b)fluoranthène	8,2E-01	8,75	5,75
53	2,3,3',4,4',5,5-HpCB (PCB 189) DL	7,3E-01	6,5	5
54	1,2-Dichloroéthane	6,7E-01	9,25	3,5
55	Chlorure de vinyle (chloroéthylène)	6,2E-01	9,5	6,5
56	Endrine	5,6E-01	6,5	6,25
57	Sélénium	5,5E-01	5,25	9
58	Di-n-butylphthalate (DBP)	5,4E-01	9	5
59	Trichlorométhane (chloroforme)	5,4E-01	9	2,5
60	Indeno(1,2,3-CD)Pyrène	5,2E-01	8,75	5,25
61	Tétrachloroéthylene	4,8E-01	9,25	5
62	Benzo(a)anthracène	4,4E-01	8,75	5,75
63	Dioxyde d'azote	4,4E-01	7,25	8
64	Benzo(k)fluoranthène	4,2E-01	8,75	5,75
65	1,4 Dichlorobenzènes	4,0E-01	9,25	4
66	Épichlorohydrine	3,9E-01	8,35	1,5
67	Naphtalène	3,9E-01	9	7
68	Toluène	3,4E-01	9,25	5,75
69	Diazinon	3,3E-01	7,5	8
70	Pentachlorobenzène	3,3E-01	7,95	3
70	Décabromodiphényléther (decaBDE)	3,3E-01	8,25	4,25

* Pour ne pas alourdir la lecture de l'article, seules les 70 premières substances sont présentées dans ce tableau. L'ensemble de la liste est détaillé dans le document référencé [1].

substances peuvent être considérées comme les plus préoccupantes au sens de l'IRC. Parmi elles figurent des représentants des familles usuelles de substances préoccupantes : métaux lourds, HAP, BTEX, phtalates, solvants chlorés, pesticides, PCB, dioxines, etc. Elles comprennent des substances classiquement considérées comme prioritaires – par exemple : trichloréthylène, mercure, dioxines, benzo(a)pyrène, etc. –, mais également des substances qui le sont moins – par exemple : acroléine, sulfite de sodium, diméthoate, etc.

L'exercice du PNSE3 a pour but de fournir des éléments d'aide à la décision, pour pouvoir répondre à l'objectif particulier : « *Quelles sont les substances préoccupantes dont il faut réduire prioritairement les expositions ?* ». La liste hiérarchisée obtenue à l'aide de l'IRC en fait partie. Elle est caractéristique de l'objectif auquel elle contribue à répondre : un autre objectif de hiérarchisation générera *a priori* une liste de substances différente.

Si l'IRC se présente sous la forme d'un rapport entre l'expression d'une exposition et l'expression d'un danger, déclinant le schéma conceptuel d'évaluation du risque, il ne prétend pas pour autant fournir une valeur proche du risque collectif réel, exercice trop complexe pour être traité à l'aide d'un outil aussi simple. L'IRC constitue une aide pour les décideurs dans l'établissement d'une liste de substances prioritaires, pas une évaluation de risque réalisée pour chaque substance.

L'objectif de l'IRC est avant tout de pouvoir comparer les substances entre elles grâce à un processus systématique, et ainsi de pouvoir les ranger selon la notion de risque collectif. Toute conclusion du type « IRC > XX => nécessité de réduire le risque » constituerait une surinterprétation des informations apportées par l'IRC, et ne saurait être valide *a priori*.

La moyenne générale des NQ est égale à 5,8 – ce qui indique une assez faible disponibilité de données : cela constitue une première limite de l'exercice.

La moyenne des NQ portant sur les 20 premières substances est égale à 8, celle qui porte sur les 50 premières substances est égale à 8,2. Ces valeurs permettent de conclure que, globalement, les rangs les plus élevés ont été déterminés en se basant sur une assez bonne disponibilité de données.

Cette conclusion comporte une exception notable dans le cas des dioxines, furannes et PCB « *dioxine*

Copyright © 2021 John Libbey Eurotext. Téléchargé par PRENOM VAUDELIN le 15/10/2021.

Copyright © 2021 John Libbey Eurotext. Téléchargé par PRENOM VAUDELIN le 15/10/2021.

like »[19] : ces substances figurent parmi les premières places de la liste mais leur IRC a été obtenu :
– par modélisation EUSES, car des données de mesures d'exposition moyenne n'étaient pas disponibles[20] ;
– en se basant parfois sur des données caractérisant la famille de substances, à défaut d'avoir des valeurs pour chacun de ses congénères.

Plus généralement, les valeurs de NQ permettent de caractériser la fiabilité des rangs obtenus :

– une substance positionnée dans le haut de la liste obtenue et ayant une forte NQ peut être considérée, en première approche, comme faisant effectivement partie des substances les plus prioritaires. Par exemple : le formaldéhyde ;
– une substance positionnée dans le bas de la liste obtenue et ayant une forte NQ peut être considérée, en première approche, comme ne faisant effectivement pas partie des substances les plus prioritaires[21]. Par exemple : le benzo(g,h,i)pérylène ;
– une substance positionnée dans le bas de la liste obtenue et ayant une faible NQ ne peut pas être considérée comme faisant partie des substances les moins prioritaires : elle doit faire l'objet d'un examen approfondi. Par exemple : l'acide p-toluène sulfonique monohydrate. Plus généralement, les faibles NQ permettent d'identifier les plus forts besoins en acquisition de connaissances.

L'IPS permet au décideur, notamment, d'identifier les substances qui ne sont pas classées parmi le haut de la liste, mais pour lesquelles la société a été informée d'aspects préoccupants. C'est par exemple le cas du formamide.

La construction de l'IPS a fait suite à une proposition des parties prenantes consultées. Cet indicateur illustre donc aussi l'intérêt de la mise en œuvre d'un processus participatif, qui permet de tirer profit des différentes approches existantes pour aborder un même sujet.

Certaines substances peuvent ne pas figurer dans le haut de la liste obtenue, alors qu'elles font l'objet de préoccupations connues. Outre les problématiques de disponibilité de données, qui sont tracées par la NQ, ce constat peut également s'expliquer par :
– les limites de la démarche d'évaluation des risques. Par exemple, la perturbation endocrinienne n'est pas quantifiable dans ce cadre. Ainsi, le bisphénol A se trouve au rang 152 ;
– des préoccupations liées à des surexpositions locales, que l'exposition moyenne de l'IRC ne permet pas d'identifier. C'est par exemple le cas du chlordécone (non classé) ;
– des préoccupations liées à des caractéristiques particulières de la substance, qui ne sont pas directement traduisibles en termes de risque collectif. Ainsi le PFOS, qui est principalement connu pour sa forte persistance dans l'environnement, se trouve au rang 136.

À l'inverse, certaines substances peuvent figurer dans le haut de la liste obtenue, alors qu'elles ne sont manifestement pas de nature à générer un problème de santé publique. C'est le cas de certains oligo-éléments, comme le zinc (rang 35) ou le cuivre (rang 40) : compte tenu du fait que les apports moyens de la population générale sont supérieurs à 10 % de la dose toxique de référence, un P_{exp} de 10 ([22]) génère un IRC supérieur à 1, ce qui classe ces substances parmi le haut de la liste.

Ces cas particuliers montrent les limites inhérentes à l'application systématique d'un indicateur simple, dans le but de caractériser une notion complexe pour plusieurs centaines de substances.

La caractérisation du danger se base préférentiellement sur la VTR de la substance. Concernant les effets à seuil, la VTR caractérise l'effet dit « critique », c'est-à-dire le premier effet observable lorsque la dose d'exposition augmente, quelle que soit sa gravité. C'est donc également le cas des IRC calculés. Ainsi, les IRC de l'univers sont comparés entre eux, bien qu'ils caractérisent des effets de nature et de gravité différentes. Il s'agit d'une limite importante de l'IRC, qui pourrait donner lieu à de futurs développements.

Bien que EUSES soit un outil de référence au niveau européen, il fournit des modélisations multimédias basées sur des hypothèses simples, auxquelles sont associées des incertitudes qui peuvent être importantes [22]. C'est notamment le cas des substances lipophiles, pour lesquelles les doses ingérées peuvent être fortement surévaluées[23]. Ce biais a probablement contribué à faire évoluer les PCB-DL, dioxines et furannes vers le haut de la liste.

Plus généralement, chaque étape de la construction de l'IRC présente de fortes hypothèses simplificatrices. Les incertitudes correspondantes sont significatives et ne peuvent être quantifiées précisément. Cela constitue une limite importante de l'IRC, même si son objectif est avant tout de comparer les substances entre elles par un processus systématique, et non pas d'essayer d'obtenir une estimation approximative du risque collectif.

[19] C'est-à-dire ayant des mécanismes de toxicité proches de ceux des dioxines de par leurs structures similaires.
[20] Pour la voie ingestion, la principale voie d'exposition au PCB, EAT2 fournit une dose moyenne d'exposition pour l'ensemble des PCB-DL, dioxines et furannes, donnée non transposable au calcul d'un IRC pour une substance individuelle.
Les mesures de contamination de l'environnement sont généralement localisées aux alentours de sites à risque. Elles sont donc non représentatives de l'exposition moyenne en France.
[21] Dans les limites du périmètre du présent exercice.

[22] L'ensemble de la population est exposé.
[23] Jusqu'à plus d'un facteur 1 000 pour certaines substances très lipophiles.

Tableau 3. Position dans la liste des indicateurs de risque collectif (IRC) des substances visées par les Plans nationaux santé environnement.

Table 3. Position in the IRC list of the substances targeted by previous French National Environment and Health Action Plans.

Substances	N° PNSE et action	Rang IRC
HAP (dont benzo(a)pyrène)	PNSE 2 (action 5)	26 et +
Benzène	PNSE 1 (action 7) et PNSE 2 (action 5)	19
Solvants chlorés (dont tri- et tétrachloroéthylène)	PNSE 2 (action 5)	15 et +
Cadmium	PNSE 1 (action 7)	21
Arsenic	PNSE 2 (action 5)	29
Plomb	PNSE 1 (action 7) et PNSE 2 (action 17)	32
PCB	PNSE 2 (action 5)	1 et +
Dioxines	PNSE 1 (action 7) et PNSE 2 (action 5)	3 et +
Mercure	PNSE 1 (action 12) et PNSE 2 (action 5)	30
Chlorure de vinyle	PNSE 1 (action 7)	55
Formaldéhyde	PNSE 2 (action 7)	12

Malgré ces limites, les résultats obtenus montrent que la plupart des substances préoccupantes connues se trouvent en tête de la liste IRC [1]. C'est par exemple le cas des substances visées par les deux premiers PNSE (*tableau 3*), sélectionnées par avis d'experts.

Par ailleurs, dans le cadre de la préparation du PNSE3, une analyse multicritère a permis de générer des ordres de substances correspondant à d'autres logiques de décision, identifiées avec des personnes issues de la société civile [23]. La liste hiérarchisée IRC, elle, traduit une logique de santé publique basée sur la notion de risque collectif.

Fournir plusieurs listes aux décideurs, chacune accompagnée de sa logique sous-jacente, permet :
– d'éclairer les intérêts et les limites de chaque liste ;
– de nourrir la réflexion des décideurs, en leur fournissant plusieurs points de vue sur ce qu'est une substance préoccupante.

Conclusion

Afin d'appuyer les décideurs qui devront choisir les substances prioritaires du futur PNSE, l'Ineris a élaboré un indicateur caractérisant le risque collectif (IRC) des substances. Cet indicateur s'inspire de celui qu'Eurostat utilise pour suivre l'efficacité de la mise en œuvre du règlement européen REACh, en l'adaptant au contexte spécifique du PNSE.

La méthode de construction de l'IRC et les détails de sa déclinaison pratique ont fait l'objet d'une démarche participative, impliquant des experts en matière de risque et des personnes issues de la société civile.

Un calcul d'IRC a été réalisé pour les substances de l'exercice du PNSE3. Ces substances ont ensuite été rangées selon leur valeur d'IRC. Ce rangement a permis de distinguer une cinquantaine de substances pouvant être considérées, en première approximation, comme les substances les plus préoccupantes au regard du risque collectif généré.

Parmi ces substances figurent des représentants des familles usuelles de substances préoccupantes : métaux lourds, HAP, BTEX, phtalates, solvants chlorés, pesticides, PCB, dioxines, etc. Elles comprennent des substances classiquement considérées comme prioritaires – par exemple : trichloréthylène, mercure, dioxines, benzo(a) pyrène, etc., mais également des substances qui le sont moins – par exemple : acroléine, sulfite de sodium, diméthoate, etc.

Afin de pouvoir décrire plus finement les surexpositions locales, un « IRC local » a été testé sur quelques substances. Ce thème pourrait faire l'objet de futurs développements. ■

Remerciements et autres mentions

Nous remercions les membres de la Commission d'orientation de la recherche et de l'expertise (CORE) de l'Ineris, pour leurs avis critiques et leurs suggestions d'amélioration ; les experts sollicités lors de la construction de la méthode, internes et externes à l'Ineris, tout particulièrement Sandrine Andres, pour leur appui technique lors de la construction de l'IRC ; le ministère en charge de l'Écologie, pour le financement de l'étude.

Financement : ministère en charge de l'Écologie ; **liens d'intérêts** : aucun.

Copyright © 2021 John Libbey Eurotext. Téléchargé par PRENOM VAUDELIN le 15/10/2021.

Copyright © 2021 John Libbey Eurotext. Téléchargé par PRENOM VAUDELIN le 15/10/2021.

Références

1. Karr G, Boudet C, Ramel M. *Définition d'une méthode d'identification et de hiérarchisation de substances préoccupantes. Application au cas particulier de la préparation du troisième Plan National Santé Environnement*. Rapport INERIS ref. DRC-12-125943-04682A. Verneuil-en-Halatte : Ineris, 2013.

2. Grammont V, Boudet C. *Hiérarchisation des substances : Identification des listes existantes de substances prioritaires*. Rapport N° DRC-09-104007-10463A. Verneuil-en-Halatte : Ineris, 2009. www.ineris.fr/centredoc/rapport-drc-09-104007-10463a-1352824865.pdf.

3. Hubert P. Pour un meilleur usage du risque attribuable en santé environnementale. *Environ Risque Sante* 2003 ; 2 : 266-78.

4. Cassadou S, Quénel P, Zeghnoun A. Impact sanitaire de la pollution atmosphérique : des questions et des réponses. Réponse à l`éditorial de Jacques Estève. *Environ Risque Sante* 2003 ; 2 : 85-8.

5. Bonvallot N, Mullot JU, Solal C, Dor F. Méthode d'identification et de hiérarchisation des substances reprotoxiques pour la construction de valeurs toxicologiques de référence. *Environ Risque Sante* 2009 ; 8 : 119-31. doi: 10.1684/ers.2009.0236

6. Hansen B, Van Healst A, Van Leeuwen K, Van der Zandt P. Priority setting for existing chemicals: European Union risk ranking method. *Environ Toxicol Chem* 1999 ; 18 : 772-9.

7. United States Environmental Protection Agency. *Developing the risk-screening environmental indicators*. Washington (DC) : US EPA. http://www.epa.gov/opptintr/rsei/pubs/rsei_development.pdf

8. Nedellec V, Lapkoff J, Rabl A. Hiérarchisation des polluants chimiques émis par les installations de traitement des déchets ménagers en France basée sur les impacts sanitaires non cancérigènes. *Environ Risque Sante* 2012 ; 11 : 120-36. doi: 10.1684/ers.2012.0520

9. Mitchell RR, Summer CJ, Blonde SA, *et al*. SCRAM: A scoring and ranking system for persistent, bioaccumulative, and toxic substances for the North American Great Lakes - resulting chemical scores and rankings. *Human Ecol Risk Assess* 2002 ; 8 : 537-57.

10. Sailaukhanuly Y, Zhakupbekova A, *et al*. On the ranking of chemicals based on their PBT characteristics: comparison of different ranking methodologies using selected POPs as an illustrative example. *Chemosphere* 2013 ; 90 : 112-7.

11. Dulio V. *Hiérarchisation des substances pour les milieux aquatiques - II-A-01 – Amélioration des connaissances sur les substances émergentes* - Avril 2011 - Programme scientifique et technique - Année 2010 - État d'avancement 2010. Saint-Pierre-des-Corps : Onema, 2010. www.onema.fr/IMG/pdf/2011_018.pdf

12. Daginnus K, Gottardo S, Payá-Pérez A, Whitehouse P, Wilkinson H, Zaldívar JM. Model-Based Prioritisation Exercise for the European Water Framework Directive. *Int J Environ Res Public Health* 2011 ; 8 : 435-55.

13. von der Ohe PC, Dulio V, Slobodnik J, *et al*. A new risk assessment approach for the prioritization of 500 classical and emerging organic microcontaminants as potential river basin specific pollutants under the European Water Framework Directive. *Sci Total Environ* 2011 ; 409 : 2064-77.

14. McKone TE, Layton DW. Screening the potential risks of toxic substances using a multimedia compartment model: Estimation of human exposure. *Regul Toxicol Pharmacol* 1986 ; 6 : 359-80.

15. Kaloyanova F, Dura G, Kambourova V. Results of the use of two environmental models for pesticides ranking by hazard. In : *Modelling of Environmental Chemical Exposure and Risk*. NATO Science Series: IV: Earth and Environmental Sciences 2. 2001.

16. Direction générale de la Santé. *Circulaire interministérielle DGS/SD 7 B no 2005-273 du 25 février 2005 relative à la prise en compte des effets sur la santé de la pollution de l'air dans les études d'impact des infrastructures routières*.

17. Huijbregts MAJ, Rombouts LJA, Ragas AMJ, van de Meent D. Human-toxicological effect and damage factors of carcinogenic and noncarcinogenic. chemicals for life cycle impact assessment. SETAC. *Integr Environ Assess Manage* 2005 ; (1-3):181-244.

18. Rosenbaum RK, Bachmann TM, Gold LS, *et al*. USEtox—the UNEP-SETAC toxicity model: recommended characterisation factors for human toxicity and freshwater ecotoxicity in life cycle impact assessment. *Int J Life Cycle Assess* 2008 ; 13 : 532-46.

19. *The REACH baseline study - A tool to monitor the new EU policy on chemicals; REACH (Registration, Evaluation, Autorisation and restriction of Chemicals)*. Brussels : Eurostat, 2009.

20. Caudeville J, Boudet C, Govaert G, Bonnard R, Denys S, Cicolella A. Construction d'une plate-forme intégrée pour la cartographie de l'exposition des populations aux substances chimiques de l'environnement. *Environ Risque Sante* 2011 ; 10 : 239-42. doi: 10.1684/ers.2011.0442

21. Karr G, Boudet C, Ramel M. *Hiérarchisation de substances : définition d'une stratégie de hiérarchisation et mise en application sur un nombre limité de substances : second rapport d'étape*. Rapport INERIS réf. DRC-11-115712-00485B. Verneuil-en-Halatte : Ineris, 2011.

22. Bonnard R. *Analyse de la sensibilité et de l'incertitude liées au modèle d'exposition de l'homme aux substances chimiques (EUSES). Module d'exposition de l'homme* via *l'environnement*. Rapport d'étude INERIS 01/09/2005, N°67645/166. Verneuil-en-Halatte : Ineris, 2005.

23. Karr G, Boudet C, Le-Gall AC, Brignon JM, Rouil L, Ramel M. Aide au choix de substances prioritaires en Santé environnementale : un processus associant un avis d'expert et une analyse multicritère participative. *Environ Risque Sante* 2014 ; 13 : 135-43. doi: 10.1684/ers.2014.0686

L’article suivant est présenté et analysé à la section 2.C.

Karr G, Nicolas M, Maupetit F et al. Cleaning product emissions and indoor built environments: Exposure and health risk assessments from experiments under realistic indoor conditions. Building and Environment 2021; 206 : 108384. DOI : https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108384.

Building and Environment 206 (2021) 108384

Contents lists available at ScienceDirect

Building and Environment

journal homepage: www.elsevier.com/locate/buildenv

Cleaning product emissions and indoor built environments: Exposure and health risk assessments from experiments under realistic indoor conditions

Guillaume Karr [a,*], Mélanie Nicolas [b], François Maupetit [b], Martine Ramel [a]

[a] INERIS (French National Institute for Industrial Environment and Risks), Verneuil-en-Halatte, France
[b] CSTB (Scientific and Technical Center for Building), Saint Martin D'Hères, France

ARTICLE INFO

Keywords:
Consumer products
Indoor air quality
Generic exposure scenarios
Stakeholder participation
Household cleaning sessions
Inhalation exposures

ABSTRACT

Cleaning products are among the most widely used consumer products. The associated risks should be better understood. The health risk assessment (HRA) approach was applied to household uses of cleaning products, with nineteen products of various types and formats tested under typical indoor environmental parameters in an experimental house. The targeted substances included volatile organic compounds (VOCs) and carbonyl compounds. The generic "Common Use" and "Reasonable Worst-Case" scenarios under consideration were based on full cleaning sessions. These sessions were elaborated from data available in the technical and scientific literature, combined with stakeholder participation. The Common Use scenario included a 1 1/2-h cleaning session once per week, followed by manual ventilation; the Reasonable Worst-Case scenario included a 4-h session twice per week without manual ventilation. No situation of concern was found regarding chronic inhalation exposures associated with Common Use. For the Reasonable Worst-Case scenario, the assessed chronic inhalation risks were low. Assessed acute inhalation exposures (1-h exposures) could exceed the selected health values, mainly for acrolein (exposures up to 12 μg/m^3) and formaldehyde (exposures up to ~140 μg/m^3). Associated first observed effects could include nasal, throat, and eye irritation. These results suggest that the highest exposures should be reduced and, to this end, that the emissions of the most emissive products should be reduced. Since the identified priority substances of concern are not specific to cleaning product emissions, multisource cumulative exposures are expected with the use of other consumer products, e.g., paints, incense, scented candles, furniture, and fragrance diffusers.

1. Introduction

In temperate climates, most people spend nearly 90% of their time in indoor environments, mainly at home. Consequently, indoor air quality is a topic of major importance to public health [1–3].

Cleaning products are widely used household consumer products [4,5] that are intended to make cleaning the house easier. They constitute a specific indoor emissions source of air pollutants, e.g., carbonyl compounds, aerosols, and terpenes [2,6–10], and they are a subject of concern [11–15], especially for children [16,17] due to the specific metabolism and vulnerabilities associated with their developing bodies [18,19]. The associated risks should be better understood [20–22]. In particular, few health risk assessments (HRAs) have been conducted in the scientific literature; they have focused on a limited selection of products tested in emissions test chambers and on modeling a few target substances [23–25]. Furthermore, available data about household uses of cleaning products have mainly been provided about generic types of products, i.e., wide thematic categories of products, e.g., all-purpose cleaners, bathroom cleaners, window cleaners, etc. These types of products have been considered individually; i.e., the available data are specific to one particular type of product, regardless of the potential uses of other types of products, e.g., the use frequency of a window cleaner with no information about the potential use of an all-purpose cleaner in the same cleaning session [10,26–31]. In other words, the available data do not describe the uses of multiple products in a cleaning session ("co-uses") and how these uses vary among the different rooms of a

Abbreviations: AIC, average inhaled concentration; ARR, acute risk ratio; HAC_{max}, maximum 1-h average concentration; IER, individual excess risk; TER, threshold effect ratio; TRV_T, threshold toxicity reference value; TRV_{NT}, nonthreshold toxicity reference value; TRV_{acute}, acute toxicity reference value; VOCs, volatile organic compounds.

* Corresponding author. Parc Technologique ALATA, BP 2, 60550, Verneuil-en-Halatte, France.
E-mail address: guillaume.karr@ineris.fr (G. Karr).

https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108384
Received 14 April 2021; Received in revised form 21 August 2021; Accepted 19 September 2021
Available online 21 September 2021
0360-1323/© 2021 Elsevier Ltd. All rights reserved.

private dwelling. Indeed, characterizing the co-uses of full, multiroom and multiproduct household cleaning sessions constitutes a challenge [5,27].

This study aimed to contribute to a better characterization of the inhalation exposures and risks associated with household uses of cleaning products: an HRA was conducted for nineteen cleaning products of various types and formats, tested under realistic indoor conditions (i.e., under typical indoor environmental parameters). In particular, this HRA aimed to identify the emitted substances of greatest concern and to assess the associated health issues.

This study is based on the measurement data produced in the ADOQ (Domestic Activities and Indoor Air Quality) project [32].

2. Materials and methods

2.1. Experiments under realistic conditions

Nineteen cleaning products were selected, aiming èto obtain various types (e.g., floor cleaners, all-purpose cleaners, bathroom cleaners, window cleaners) and formats (e.g., liquids, sprays, wipes, creams) among those commonly used in France [33].

Emissions into indoor air from the selected products were tested in the "Mechanized House for Advanced Research on Indoor Air" (MARIA; Marne-la-Vallée, France) [34]. Measurements were performed in a 32-m^3 bedroom, an 18-m^3 bathroom and a 27-m^3 kitchen. These rooms are empty of additional furniture, and the finishing coatings are minimal: raw concrete floor, painted plasterboard walls, and painted concrete ceiling. All of the experiments were conducted under realistic conditions, especially regarding the air exchange rate. The indoor air conditions of the rooms, e.g., temperature and relative humidity, were monitored continuously. The ventilation of each room was controlled.

A detailed physicochemical characterization of the emissions was performed [9,32,35,36] using online instrumentation (including Aerosol Mass Spectrometer Compact Time-of-Flight (AMS-c-TOF); specific analyzers (compact-GC-FID for C2–C6 and C6–C12; ozone; nitrogen oxides); FID chromatograph; and Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS)) and off-line chemical analysis for gaseous phase (DNPH cartridges and Tenax TA adsorbent tubes) and particulate phase (filters). This instrumentation allowed us to characterize both primary emitted substances and secondary substances formed during and after use and to monitor emitted fine particles of concern (e.g., submicron and ultrafine particles, including ozone-induced secondary particles).

Volatile organic compounds (VOCs) and carbonyl compounds were sampled and analyzed according to ISO 16000–6 [37] and 16,000–3 [38], respectively. To search for limonene oxidation tracers, a specific analytical approach was employed; i.e., molecular composition was investigated using derivatization prior to thermal desorption coupled with gas chromatography and mass spectrometry (TD-GC-MS) analysis.

Two sets of experiments were performed: the first in summertime and the second in wintertime. Following the recommendations of the manufacturers, the selected cleaning products were applied with predetermined procedures (see details in Supplementary Material), including specific durations of use.

After checking the background level of pollutants in the room, particulates and volatile gaseous compounds were measured during the five 30-min periods following the beginning of use (i.e., from 0 to 30 min, from 30 to 60 min, from 60 to 90 min, from 90 to 120 min, and from 120 to 150 min, respectively). The first "0–30 min" measurement period included the use phase of the product. Air samples were obtained close to the user, approximately at the height of airways (1.50 m) in a zone associated with efficient air mixing.

After reviewing the scientific literature [7,10,15,20,23–25,39] and pretesting in emissions test chambers, the selected targeted substances included VOCs, such as benzene, toluene, ethylbenzene, styrene, xylenes, and naphthalene; carbonyl compounds, such as formaldehyde, acetaldehyde, acetone, propionaldehyde, benzaldehyde and acrolein; and terpenes, such as D-limonene and alpha-pinene. Semivolatile organic compounds (SVOCs) were not in the scope of this HRA.

2.2. Elaboration of generic exposure scenarios

2.2.1. Common use and Reasonable Worst-Case scenarios

Household exposures to cleaning product emissions can vary with multiple factors, e.g., product uses (which can vary with age, gender, sociodemographic status, geographical area, etc.), ventilation practices, the environmental characteristics of the exposed persons (e.g., ventilation and volume of the considered rooms), and times spent in each considered room (which can vary with the types of inhabitants, e.g., children, students, housekeepers, retired people, salaried adults). Regarding the difficulty of managing the complexity of such multicriterion variability, the choice was made to base the HRA, as a first approach, on two types of generic exposure scenarios, i.e., the Common Use scenario and the Reasonable Worst-Case scenario. This choice allowed us to study two substantially different levels of exposure as a simple way to characterize the actual variability. The Common Use scenario aimed to characterize a user whose practices and environmental characteristics (volume of the room, air change rate, etc.) are common, being approximately the average of the observed practices and characteristics according to French and European surveys [4,40,41]. The Reasonable Worst-Case scenario aimed to characterize a user whose practices and environmental characteristics reasonably increase the average exposure (reasonably conservative choices, according to French and European surveys).

Each scenario was defined by several components: type of room to be cleaned, volume (m^3) and daily presence (h/d) for each considered room; ventilation (air change rate expressed in changes/h); duration of exposure in a lifetime (years); potential manual ventilation of the room (i.e., a user opens a window to temporarily increase the natural ventilation level) during or after the use of cleaning products; cleaning session, i.e., types of products used in each room; and the associated frequencies and durations of use. To be integrated with the Common Use scenario and the Reasonable Worst-Case scenario (Table 1; Table 2), a Common Use session and a Reasonably Elevated Use session were elaborated based on the same logics.

2.2.2. Cleaning sessions elaborated with data available in the literature

A review of the technical and scientific literature was conducted to collect and analyze available data about household uses of cleaning products. These data (e.g., quantities used, frequencies and durations of use) are mainly provided by wide thematic categories of products considered individually; i.e., the available data are specific to one category potentially used in a cleaning session, regardless of the potential uses of other categories, e.g., use frequency of a floor cleaner with no information about the potential use of an all-purpose cleaner in the same cleaning session [10,26–31]. Although some studies have provided data on co-uses (i.e., uses of different products within the same cleaning session) [40,42,43], they did not describe how the studied co-uses varied with the considered rooms and influenced the use levels of each type of product; e.g., an all-purpose cleaner user may tend to result in use of fewer specific-purpose products (floor cleaner, window cleaner, bathroom cleaner, etc.). In particular, the available data did not allow us to characterize detailed co-uses of full, multiroom and multiproduct household cleaning sessions [5,27].

Aiming to come closer to the observed household practices, the exposure assessment of this HRA was based on two elaborated full cleaning sessions: a Common Use session, which aims to describe a user whose practices are common and which are in the average of the observed practices; and a Reasonably Elevated Use session, which aims to describe a user whose practices reasonably increase common levels of use. Each session consists of several components: rooms to be cleaned; for each room considered, types of product used; and for each type of product in each room, the frequency and duration of use.

Table 1
Cleaning sessions selected for the health risk assessment (HRA).

Common Use Session	Reasonably Elevated Use Session
Once a day (average durations of use):	*Once a day (average durations of use):*
• Kitchen o Dishwashing product: 10 min o All-purpose cleaner: 10 min	• Kitchen o Dishwashing product: 30 min o All-purpose cleaner: 20 min o Floor cleaner: 5 min
In addition, once a week (average durations of use):	• Toilet o WC cleaner: 5 min
• Kitchen o All-purpose cleaner: 15 min o Floor cleaner: 10 min o Window cleaner: 10 min (once every 3 weeks)	• Bathroom o Bathroom cleaner: 10 min
	In addition, twice a week (average durations of use):
• Bedrooms (2) – time per room o Floor cleaner: 5 min o Window cleaner: 5 min (once every 3 weeks)	• Kitchen o All-purpose cleaner: 20 min o Floor cleaner: 10 min o Window cleaner: 10 min
• Bathroom o Bathroom cleaner: 10 min o Bleach to dilute: 5 min o Floor cleaner: 5 min o Window cleaner: 5 min (once every 3 weeks)	• Bedrooms (4) – time per room o Dust cleaner: 10 min o Floor cleaner: 10 min o Window cleaner: 5 min
	• Bathroom o Bathroom cleaner: 15 min o Bleach to dilute: 10 min o Floor cleaner: 10 min o Window cleaner: 5 min
• Toilet o Floor cleaner: 5 min o WC cleaner: 5 min	• Toilet o WC cleaner: 10 min o Bleach to dilute: 5 min
• Living/dining room o Floor cleaner: 15 min o Window cleaner: 10 min (once every 3 weeks)	• Living/dining room o Floor cleaner: 20 min o Dust cleaner: 15 min o Window cleaner: 10 min
	• Cellar/storage room: o All-purpose cleaner: 5 min
Weekly total: 1 session per week, lasting 1 h and 35 min	Weekly total: 2 sessions per week, lasting 4 h and 5 min each

Table 2
Generic exposure scenarios elaborated for the health risk assessment.

Scenario components		Cleaning product users	
		Reasonable Worst Case	Common Use
Frequencies and durations of use (/day)	Restroom (WC) Living/dining room Kitchen Entrance hall Bathroom Bedroom(s) Cellar/ storeroom	Reasonably Elevated Use Session	Common Use Session
Presence in the room during and after use		Yes	Yes
Years of exposure (years)		70	70
Manual ventilation (opening to the outside)		No manual ventilation	10 min after use
Air change rate (/h)		0.35	0.35

First, a proposal for the two considered sessions was elaborated based on best compromises between data available in the technical and scientific literature [4,29,40,42,44–46]. For each session, the selected values of each component aimed to obtain sessions that were reasonably coherent with as many sources of information as possible. Typically, the components of the Common Use session and of the Reasonably Elevated Use session were chosen from the approximately 50th and 90th percentiles of the collected data, respectively. In the case of substantially conflicting data or data with substantial variability, the preference choice targeted the most detailed and recent data produced by public funding and, if necessary, characterizing French uses.

2.2.3. Stakeholder participation

The elaborated cleaning sessions were sent for comments to a selection of stakeholders, i.e., persons or organizations that, regarding their activity, are interested in the results of this HRA. The selected stakeholders were from various backgrounds, e.g., companies providing home cleaning services, indoor environment medical consultants, environmental health associations, environmental health public organizations, family associations, cleaning product manufacturers, consumer associations, and private housekeepers. The objectives of this consultation were: (i) to identify potential inconsistencies in the elaborated sessions; and (ii) in the absence of statistically representative data, to collect feedback from different stakeholder profiles to contextualize the values selected for the cleaning sessions of this study. For example, each stakeholder profile could provide a different set of responses to the following questions: "*Is a type of product missing in the considered cleaning sessions? For each considered type of product in each considered room, is the selected average duration appropriate? What do you think about the total length of the considered sessions?*" These different feedbacks are all elements of knowledge, which could support a proactive critical analysis.

2.3. Exposure assessment

This HRA aimed to contribute to a better characterization of inhalation exposures. Other exposure routes (e.g., ingestion and dermal contact) were not within the scope of the work.

A house with classic types of rooms was considered for this HRA, with the following characteristics: kitchen (volume: 30 m^3; daily presence: 2.75 h/d), bedroom (45 m^3; 8.5 h/d), bathroom (24 m^3; 1 h/d), living/dining room (90 m^3; 5.75 h/d), restroom (5 m^3; 0.5 h/d), entrance hall (12 m^3; 0.5 h/d) and storeroom (10 m^3; 0.5 h/d). An air change rate of 0.35/h was retained for the entire house. These characteristics are consistent with those used for other European studies [10,47], including the HRA of the European EPHECT project (considered population groups: housekeepers and retired people).

Sorption/desorption phenomena and migration within the house were not quantified, assuming that the associated variability is much lower than the uncertainties associated with the other assumptions of the HRA.

The concentrations measured under realistic conditions were extrapolated to daily average concentrations based on the following hypotheses: 10 min of manual ventilation after use is supposed to renew the air of the room (Common Use scenario) [4,48]; otherwise, concentrations in the room are supposed to be influenced only by the selected air change rate (Reasonable Worst-Case scenario). For each elaborated scenario (Table 1; Table 2) and each emitted substance, these hypotheses were used to derive concentrations at each time of the day in each room. Then, daily average concentrations were calculated in each room.

From these daily average concentrations, average inhaled concentrations (AICs) were calculated by applying the components of each generic exposure scenario, e.g., daily durations of use and daily presence in each room. For each emitted substance, the AICs of each room were summed to obtain an AIC characterizing an average daily presence in the whole house under consideration (AIC_{house}).

These calculated AIC_{house} values characterized chronic inhalation exposures.

Acute exposures were also assessed. In general, this type of exposure corresponds to periods that could vary from 1 h to a few days. Considering the typical household uses of cleaning products, an exposure of 1 h was retained for the HRA. Therefore, acute exposures were characterized by maximum 1-h average concentrations (HAC_{max}), calculated with the two highest maximum half-hour exposures (minimum considered daily presence in a room), among all of the considered rooms.

2.4. Selection of toxicity values

For both chronic effects and acute effects, a collection and a choice of toxicological reference values (TRVs) were made from the TRVs present in usual reference databases – including those from the United States Environmental Protection Agency (US EPA), World Health Organization (WHO), Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR), French Agency for Food, Environmental and Occupational Health & Safety (ANSES), Health Canada, Dutch National Institute for Public Health and the Environment Ministry of Health (RIVM) and California Office of Environmental Health Hazard Assessment (OEHHA) – for each tested substance. This choice was made for threshold effects (TRV_T), nonthreshold effects (TRV_{NT}) and acute effects (TRV_{acute}). Since HAC_{max} was selected to characterize acute exposures, the TRVs associated with a 1-h exposure were chosen preferentially.

When no TRV was available for chronic exposures, the derived European Lowest Concentration of Interest (EU-LCI) [49], elaborated with a method similar to that used for TRVs, was considered additional information.

2.5. Health risk assessment

Based on the exposures calculated with the concentrations measured under realistic conditions and with the elaborated generic exposure scenarios, each including a full cleaning session, an HRA was conducted [50,51].

The scope of this HRA focused on the inhalation route of exposure. Chronic threshold and nonthreshold risks, as well as acute risks, were quantified by the following risk indicators: threshold effect ratio (TER), individual excess risk (IER) and acute risk ratio (ARR).

$$TER = \frac{AIC_{house}}{TRV_T} \quad (1)$$

$$IER = \frac{AIC_{house} \times TRV_{NT} \times Years\ of\ exposure}{Lifetime\ of\ 70\ years} \quad (2)$$

$$ARR = \frac{HAC_{max}}{TRV_{acute}}. \quad (3)$$

where TER is the threshold effect ratio, AIC is the average inhaled concentration, TRV_T is the threshold toxicity reference value, IER is the individual excess risk, TRV_{NT} is the nonthreshold toxicity reference value, ARR is the acute risk ratio, HAC_{max} is the maximum 1−h average concentration, and TRV_{acute} is the acute toxicity reference value.

3. Results

3.1. Elaboration of generic exposure scenarios

Stakeholder participation included a total of 32 requests. Twenty-three responses were obtained, representing a return rate of 72%. Overall, except for two people, all of the participants considered that the proposed sessions (Table S2) corresponded to the correct orders of magnitude of total time for a "Common Use" session and for a "Reasonably Elevated Use" session. Based on the detailed answers, modifications were retained when suggested by more than half the participants, e.g.: (i) the daily duration of use for dishwashing products was reduced from 30 min to 10 min in the Common Use session since more than two-thirds of the participants indicated that the use of a dishwasher was the most common situation at the time; and (ii) the use of dusting products was no longer considered since more than two-thirds of the participants indicated that the use of microfiber cloths is now more widespread.

No modifications were applied to the Reasonably Elevated Use session. Overall, opinions about this session did not show any marked trends, with one exception: the majority of the participants spontaneously indicated that the total time should be maintained, arguing that (i) such practices are plausible for a substantial part of the general population and that (ii) the exposure of those who believe in the usefulness of a high level of product use should not be underestimated. This HRA was applied based on the updated cleaning sessions (Table 1).

For other components of the generic exposure scenarios, e.g., air change rate, volumes and daily presences in the rooms selected in each scenario, the values retained for the European EPHECT project [5,10] were selected for this HRA.

3.2. Exposure assessment

For each exposure scenario, an AIC_{house} was calculated for each substance emitted by each tested product. Table 3 presents a synthetic overview (minimum, maximum, median and average data) of the obtained results for a selection of substances of interest. Tables S3 and S4 present all of the obtained results for the Common Use scenario and the Reasonable Worst-Case scenario.

Furthermore, an HAC_{max} was calculated for each substance emitted by each tested product. Table 4 presents a synthetic overview of the obtained results for a selection of substances known for their potential acute effects. Table S5 presents all of the obtained results.

3.3. Selection of toxicity values

Table 5 presents the TRVs retained for a selection of substances of interest and the associated critical effects.

No TRV was available for limonene or alpha-pinene in the consulted databases. Consequently, for chronic exposures, the derived EU-LCI values were considered additional information. These EU-LCI values are 2.5 mg/m^3 and 5 mg/m^3, respectively.

3.4. Chronic risk assessment

For each substance emitted by each tested product and under each generic exposure scenario, a TER and an IER were calculated when a TRV_T and a TRV_{NT} were available (Tables S3 and S4). The main obtained results are presented below.

3.4.1. Common use scenario

For each emitted substance considered individually, no TER and no IER exceeded the usual reference values of 1 and 10^{-5}, respectively. Moreover, for each product, no multisubstance sum of TERs and no multisubstance sum of IERs exceeded the usual reference values. Finally, based on the tested products of the highest risks for each type of product considered in the Common Use session, no multiproduct sum of TERs and no multiproduct sum of IERs exceeded the usual reference values.

3.4.2. Reasonable Worst-Case scenario

For each emitted substance considered individually, no TER and no IER exceeded the usual reference values of 1 and 10^{-5}, respectively. The substances with at least one risk indicator greater than 20% of a usual reference value (i.e., 0.2 or 2.10^{-6}) are four carbonyl compounds: acrolein, crotonaldehyde, propionaldehyde and benzaldehyde.

Exceedances of the multisubstance sum of TERs were obtained for four products, ranging from 1.1 to 1.9. No multisubstance sum of IERs exceeded the usual reference value.

Based on the tested products of greatest risk for each type of product considered in the Reasonably Elevated Use session, the multiproduct sum of TERs reached 4.6 (acrolein is associated with the highest contribution ($\sum$ TERs = 2.7)). The multiproduct sum of the IERs is less than the usual reference value.

3.5. Acute risk assessment

For each substance emitted by each tested product, an ARR was calculated when TRV_{acute} was available (Table S5). The main obtained

Table 3
Chronic exposures for a selection of substances of interest – average inhaled concentrations (AIC_{house}, μg/m^3).

Substances	CAS number	Common Use Scenario				Reasonable Worst-Case Scenario			
		Min.	Max.	Med.	Avg.	Min.	Max.	Med.	Avg.
Formaldehyde	50-00-0	0.0	1.0×10^{-1}	3.3×10^{-3}	2.1×10^{-2}	0.0	1.3×10^{1}	1.0	2.3
Benzene	71-43-2	0.0	1.9×10^{-2}	0.0	1.2×10^{-3}	0.0	2.7×10^{-1}	6.9×10^{-3}	4.2×10^{-2}
Acetaldehyde	75-07-0	0.0	1.2×10^{-1}	5.9×10^{-4}	1.2×10^{-2}	0.0	4.7	2.3×10^{-1}	7.1×10^{-1}
D-Limonene	5989-27-5	0.0	1.8	2.3×10^{-2}	2.5×10^{-1}	0.0	3.7×10^{1}	8.8×10^{-1}	5.4
Acrolein	107-02-8	0.0	2.5×10^{-2}	3.9×10^{-5}	2.1×10^{-3}	0.0	7.1×10^{-1}	3.8×10^{-2}	1.5×10^{-1}
Acetonitrile	75-05-8	0.0	6.9×10^{-2}	2.3×10^{-5}	1.7×10^{-2}	0.0	9.6	9.0×10^{-2}	2.4
Acetone	67-64-1	0.0	2.3×10^{1}	1.1×10^{-3}	7.7×10^{-1}	0.0	2.0×10^{3}	4.6×10^{-1}	7.3×10^{1}
Acetic acid	64-19-7	0.0	9.3×10^{-3}	2.9×10^{-5}	3.1×10^{-3}	3.9×10^{-3}	8.1	7.6×10^{-2}	2.7
Isopropanol	67–63–0	0.0	3.2	7.4×10^{-3}	3.5×10^{-1}	0.0	7.7×10^{1}	5.6	2.0×10^{1}

Note: Min.: minimum; Max.: maximum; Med.: median; Avg.: average.

Table 4
Calculated acute exposures for a selection of substances of interest – maximum 1-h average concentrations (HAC_{max}, μg/m^3).

Substances	CAS Number	Common Use Scenario				Reasonable Worst-Case Scenario			
		Min.	Max.	Med.	Avg.	Min.	Max.	Med.	Avg.
Formaldehyde	50-00-0	0.0	2.4×10^{2}	2.6×10^{1}	4.5×10^{1}	0.0	3.3×10^{2}	5.4×10^{1}	6.7×10^{1}
Acetaldehyde	75-07-0	0.0	1.0×10^{2}	8.3	1.5×10^{1}	0.0	4.7×10^{2}	1.3×10^{1}	4.5×10^{1}
Acrolein	107-02-8	0.0	2.3×10^{1}	2.4	3.8	0.0	3.2×10^{1}	3.6	5.6
Acetone	67-64-1	0.0	2.3×10^{4}	2.2×10^{1}	1.2×10^{3}	0.0	3.0×10^{4}	4.4×10^{1}	1.7×10^{3}
Benzene	71-43-2	0.0	2.1×10^{1}	6.1×10^{-1}	2.6	0.0	3.2×10^{1}	8.2×10^{-1}	4.9

Note: Min.: minimum; Max.: maximum; Med.: median; Avg.: average.

Table 5
Values characterizing the toxicity of several substances of interest.

CAS number	Substances	TRV_T (μg/m^3)	Org.	Date	TRV_{NT} (μg/m^3)	Org.	Dated	TRV_{acute} (μg/m^3)	Org.	Date	Critical effects
50-00-0	Formaldehyde	–	–	–	–	–	–	1.0×10^{2}	WHO	2010	Acute: Subjective and objective eye irritation
75-07-0	Acetaldehyde	1.6×10^{2}	ANSES	2014	–	–	–	3.0×10^{3}	ANSES	2014	Threshold: Degeneration of the olfactory epithelium Acute: Bronchoconstriction in asthmatic patients
107-02-8	Acrolein	1.5×10^{-1}	ANSES	2019	–	–	–	6.9	ATSDR	2007	Threshold: Lesions of the upper respiratory epithelium Acute: Nasal and throat irritation, decreased respiratory rate
108-88-3	Toluene	2.0×10^{4}	ANSES	2018	–	–	–	2.0×10^{4}	ANSES	2018	Threshold: Neurological effects (color vision disorders) Acute: Neurological effects
91-20-3	Naphthalene	1×10^{1}	WHO	2013	5.6×10^{-6}	ANSES	2013	–	–	–	Threshold: Lesions of the respiratory and olfactory epithelium Non-Threshold: Neuroblastomas of the olfactory epithelium
67-64-1	Acetone	3.3×10^{4}	ATSDR	1994	–	–	–	6.6×10^{4}	ATSDR	1994	Threshold: Neurological effects Acute: Neurological effects
71-43-2	Benzene	1.0×10^{1}	ANSES	2010	2.6×10^{-5}	ANSES	2013	2.7×10^{1}	OEHHA	2014	Threshold: Immunological disorders Non-Threshold: acute leukemia Acute: reproductive disorders, aplastic anemia and acute myeloid leukemia
67-63-0	Isopropanol	7.0×10^{3}	OEHHA	2000	–	–	–	–	–	–	Threshold: Kidney lesions in mice and rats; fetal growth retardation and developmental anomalies in rats

Notes:
† TRV_T stands for threshold toxicological reference value for the inhalation route and for chronic exposure.
† TRV_{NT} stands for no-threshold toxicological reference value for the inhalation route and for chronic exposure.
† TRV_{acute} stands for acute toxicological reference value for the inhalation route.
† Date means date of construction or date of last revision.
† Org. means producing organization.
† for formaldehyde, the absence of chronic effects is ensured by compliance with the TRV_{acute}.
† for acetaldehyde, the absence of carcinogenic effects is ensured by compliance with TRV_T.

results are presented below.

3.5.1. Common use scenario

ARR exceeded the usual reference value of "1" for two substances: (i) acrolein, for five products, with an average ARR of 1.7 and a maximum ARR of 3.3; and (ii) formaldehyde, for three products, with an average ARR of 1.9 and a maximum ARR of 2.4.

3.5.2. Reasonable Worst-Case scenario

ARR exceeded the usual reference value (1) for two substances: (i) acrolein, for eight products, with an average ARR of 1.8 and a maximum ARR of 4.6; and (ii) formaldehyde, for eight products, with an average ARR of 1.5 and a maximum ARR of 3.3.

As additional information, the maximum limonene HAC_{max} (approximately 720 μg/m^3) was far less than the acute toxicity value (90 mg/m^3 – 30-min exposure) established under the European EPHECT project [23].

4. Discussion

4.1. Exposure assessment

This study proposed a method to address the complexity of establishing representative multiroom/multiproduct cleaning sessions. This method aimed to better characterize exposures associated with household cleaning by considering hypotheses closer to the observed uses: in the absence of sufficient data on co-uses, considering a full cleaning session intended to propose an answer to two classic critiques of (regulatory) HRA: (i) quantifying risks product by product, each considered individually, without assessing potential combinations of products, could lead to underestimation of actual risks; and (ii) inversely, totaling of the risk indicators calculated for each product, considered individually, could lead to very high—sometimes unrealistic—aggregate exposures [27,30,31,52] because the corresponding individual exposures are often quantified with (very) conservative hypotheses, especially in a regulatory framework in which the objective is to ensure the absence of health effects.

A probabilistic approach might be another way of characterizing co-uses [27,51,52]. This approach presupposes that statistical distributions of uses can be established with a minimum level of uncertainty. The question of their respective correlations could remain a challenge.

The method proposed in this HRA constitutes one type of step further that does not pretend to cover every single case. The objective was to characterize the actual variability based on two points of reference—i.e., a Common Use session and a Reasonably Elevated use session—contextualized with the opinions of stakeholders of various profiles to obtain a more informed view.

Another limitation is inherent to the generic aspect of the considered scenarios: although durations of time could be attributed to each type of cleaning product in the selected rooms, a substantial variety of products can be found within the types of products considered in this study. For example, all-purpose cleaners, floor cleaners and window cleaners are general categories that include multiple subtypes of products, especially regarding formats: liquids, sprays, foams, powders, wipes; for example; the cleaning time associated with wipes is likely much shorter than the cleaning time of other formats [46], and a factor of five could be considered [40].

To our knowledge, this HRA is the first to combine measurements under realistic conditions and an established full cleaning session elaborated with stakeholder participation.

The obtained exposures were calculated from concentrations measured during the two and a half hours following the beginning of use. These field concentrations allowed us to consider the secondary substances formed in the indoor air during the measurement period. This secondary formation could represent a significant contribution to the total measured concentrations, e.g., for formaldehyde [7,53]. Field concentrations also allowed us to avoid the difficulties of simulating real emissions processes with a laboratory test chamber. These difficulties include controlling various parameters, e.g., humidity rate, oxygen rate, air flow, and temperature [32,54].

The main limitations associated with the calculation of AICs consisted of the rather simple assumptions chosen to extrapolate the measured concentrations, including a "well-mixed air" approach. This type of hypothesis was used in previous studies [7]. Moreover, household uses are frequently associated with some indirect emissions, e.g., storage-related emissions and emissions during preparation of the product. These emissions were not within the scope of this study.

4.2. Chronic and acute risk characterization

The results obtained for the Common Use scenario suggest that chronic exposures associated with the most common uses are not of concern with regard to the targeted substances, the selected products and the assumptions of this HRA.

Exceedances obtained for the Reasonable Worst-Case scenario were associated with certain multisubstance totals of risk indicators only, and the maximal sum for the full cleaning session was less than 5 (TER). Consequently, considering that this scenario aggregated multiple conservative hypotheses and with regard to the other uncertainties of this HRA, the assessed level of risks can be considered low.

Acrolein and benzene are the substances making the main contributions to the total risks for threshold effects and for nonthreshold effects, respectively. The associated maximum chronic exposures (maximum AIC_{house}), i.e., $7.1.10^{-1}$ μg/m^3 and $2.7.10^{-1}$ μg/m^3, respectively, are less than typical background concentrations that can be found in private dwellings (e.g., acrolein – median in France: 1.1 μg/m^3 [41] and benzene – mean in Europe: 3 μg/m^3 [55]).

For acute exposures, under the Reasonable Worst-Case scenario, four calculated ARRs exceeded 2, ranging from 2.1 to 4.6. The two corresponding products were in wipe format. If the likely hypothesis of overestimation by a factor of 5 (described above) is retained, then no exceedance is actually expected for these two products.

The remaining ARR exceedances less than below 2. The corresponding maximum HAC_{max} values are 12 μg/m^3 for acrolein and 140 μg/m^3 for formaldehyde. When acute exposures exceed the selected TRV_{acute}, the first observed effects are expected to be: (i) nasal and throat irritation and decreased respiratory rate for acrolein; and (ii) eye irritation for formaldehyde; however, if repeated, this irritation could lead to more severe and irreversible effects, such as nasopharyngeal carcinogenic effects.

As additional information, acrolein acute exposures (HAC_{max} up to 12 μg/m^3) can also be compared to the OEHHA Acute Reference Exposure Level (2.5 μg/m^3 - 1 h - respiratory and eye irritation [56]) and to the acute Critical Exposure Limit established for the European EPHECT project (21 μg/m^3 – 30 min - subjective eye irritation [23]).

In conclusion, with regard to the level of uncertainty associated with the hypotheses retained for this HRA, the assessed acute risks can be considered significant, ranging from low to moderate. In particular, the obtained results suggest a need to reduce the emissions of the most emissive products. To this end, several types of public health risk management actions are usually considered, e.g., regulations on composition, regulations on emissions levels, and labeling about emissions levels. The obtained results suggest that these potential actions should prioritize the reduction of acrolein and formaldehyde emissions.

In the scientific literature, few inhalation risk assessments have been conducted for cleaning products, and they considered limited selections of products and targeted substances [24,57]. These assessments concluded that no situation of concern was expected. This difference from the conclusions of this HRA can be explained by differences in the selected toxicity values and the higher maximum exposures extrapolated from direct emission measurements (e.g., in the literature, no formaldehyde acute exposure exceeds 100 μg/m^3 (max: 82 μg/m^3 for a floor cleaner)).

However, several reviews of the scientific literature, based on epidemiological studies mainly addressing professional uses, have shown an association between the use of cleaning products and various respiratory disorders, including an increased risk of asthma and of the intensity of associated symptoms [16,17,20,21,58–60]. The strongest level of evidence relates to professional uses, but multiple studies have indicated situations of concern for household use [14,16,58,61]. This

HRA suggests that the cumulative risks attributable to substances emitted by cleaning products might exceed the usual reference values, but the exceedances are mainly of small magnitudes while corresponding to a scenario integrating multiple reasonably conservative hypotheses. However, given the current state of knowledge and considering their construction method, TRVs imperfectly protect against respiratory sensitizing effects.

4.3. Priority substances of interest

Based on all of the calculated inhalation risk indicators of this HRA, the identified substances of greater interest are acrolein, formaldehyde and, to a lesser extent, benzene, crotonaldehyde, propionaldehyde and benzaldehyde.

These substances of interest are not specific to the emissions from cleaning products, especially acrolein, formaldehyde and benzene; multiple other sources of emissions are commonly present in indoor environments, e.g., furniture, air fresheners, tobacco smoke, incense, construction products, paints, cooking activities, and scented candles. Consequently, cumulative exposures are expected and could lead to higher risks than those identified for each source, considered individually. Background concentrations in European private dwellings are available for formaldehyde (minimum: 7 μg/m^3; maximum: 57 μg/m^3; mean: 22 μg/m^3) and benzene (minimum: 0 μg/m^3; maximum: 32 μg/m^3; mean: 3 μg/m^3) [10,55,62]. Acrolein background concentrations are available for French private dwellings (95th percentile: 3.4 μg/m^3; median: 1.1 μg/m^3) [41]. The health reference values considered in this HRA relate to total indoor air concentrations; in particular, they do not relate to the concentrations attributable to the use of cleaning products only. This fact suggests a need to limit the emissions of cleaning products, especially for the identified priority substances of interest, until typical cumulative exposures are less than the selected health values.

Furthermore, household uses of cleaning products can also produce fine particulate matter ($PM_{2.5}$) in indoor air, including secondary particles, e.g., particles produced by ozone-induced chemistry in the presence of terpenes [9,39,63]. Some of these particles $PM_{2.5}$ can be submicron (PM_1) in size; and some are ultrafine ($PM_{0.1}$) [24,63,64].

For the products tested in this study, particles with a size of approximately 50 nm could reach 160,000 particles/cm^3. Compared to background levels of approximately 4000 particles/cm^3, this increase can be considered a point of vigilance that should be further studied from a health point of view: in general, submicron and ultrafine particles are subjects of concern because of their higher surface reactivity and their ability to penetrate the pulmonary system [65,66].

4.4. Risk perception

Household uses of cleaning products emit substances of concern in indoor air. However, because some users assume that infectious diseases are caused by the presence of microorganisms, seeking a high level of cleanliness can be part of a preventive logic, especially in the presence of children [67,68]. This preventive logic could be reinforced by marketing and advertising strategies, especially during the global COVID-19 pandemic. For example, in online marketplaces, cleaning products could be associated with the following advertisements: "*5-in-1 virucidal cleanser*", "*Anti-virus*", "*Cleans, disinfects, removes all mold*", "*eliminates and prevents mold development*", "*cleanse your surfaces*", "*destroys 99.9% of bacteria, fungi and viruses*", and "*compliant with European antimicrobial efficacy standards*".

This type of perception could increase the level of cleaning product use. Therefore, it is not surprising that 15% of all-purpose cleaning product users in Europe use more products than recommended by the manufacturer [4].

5. Conclusions

The health risk assessment (HRA) approach was applied to indoor air emissions from nineteen cleaning products tested under realistic conditions (under typical indoor environmental parameters) in an experimental house.

Full cleaning sessions were elaborated with data available in the technical and scientific literature, combined with stakeholder participation (e.g., manufacturers, professional and private housekeepers, environmental health associations, consumer organizations). These sessions included durations of use for different types of products in each typical room of a private dwelling (e.g., kitchen, bathroom, living/dining room, bedrooms).

Two generic exposure scenarios were elaborated: a Common Use scenario, aiming to characterize a user whose practices and environmental characteristics (volume of the rooms, air change rate, etc.) are common, being approximately the average of the observed practices and characteristics; and a Reasonable Worst-Case scenario, aiming to characterize a user whose practices and environmental characteristics reasonably increase the average exposure. The Common Use scenario included a one-and-a-half-hour cleaning session once per week, followed by manual ventilation; the Reasonable Worst-Case Scenario included a 4-h session twice per week, with no manual ventilation.

To our knowledge, this HRA is the first to combine concentrations measured under realistic conditions with full cleaning sessions.

The obtained results for the Common Use scenario suggest that chronic exposures associated with the most common uses are not of concern with regard to the targeted substances, the selected products and the assumptions of this HRA.

The obtained results for the Reasonable Worst-Case scenario suggest that the highest chronic exposures are associated with low risks. In particular, no risk indicator exceeded the selected usual reference values for a substance considered individually; only multisubstance/multiproduct sums of indicators exceeded the selected health reference values.

However, the obtained results for acute (1-h) exposures suggest a need to reduce emissions from the most emissive products, especially for acrolein (up to 12 μg/m^3) and formaldehyde (up to approximately 140 μg/m^3).

Acrolein and formaldehyde are not specific to cleaning product emissions: cumulative exposures are expected with other household products, e.g., paints, incense, scented candles, furniture, and fragrance diffusers.

Emitted $PM_{2.5}$ particles could also be of concern because a large number of them are submicron and ultrafine (higher surface reactivity and greater ability to penetrate the pulmonary system).

The obtained results provide a complementary perspective to the results of the European EPHECT project [10,23]: this HRA focused on cleaning products based on actual indoor air concentrations (experimental values instead of modeled concentrations) and considered a large set of substances. The same strategy, combining experiments under realistic conditions and stakeholder input regarding uses, could be implemented to assess the health risks of many other usual consumer products. The scope of these potential future assessments could also be extended to SVOCs.

Funding

This work was supported by the French Ministry of the Environment (Ministère de la Transition Écologique – Ineris' support program DRC30 2017–2019).

The ADOQ project was supported by the French Ministry of the Environment and by the French Agency for Ecological Transition (ADEME – grant number: 962C0071).

CRediT authorship contribution statement

Guillaume KARR: Conceptualization, Formal Analysis, Methodology, Writing – Original Draft; Mélanie NICOLAS: Resources, Investigation, Validation, Data Curation, Writing – Review and Editing; François MAUPETIT: Writing – Review and Editing, Project Administration; Martine RAMEL: Conceptualization, Methodology, Validation, Writing – Review and Editing, Funding Acquisition, Project Administration.

Declaration of competing interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Acknowledgments

The authors would like to thank Nathalie Velly (Ineris) for her technical support and Barbara d'Anna (LCE Univ. Aix-Marseille France) and Laura Chiappini for their contributions to the production of the ADOQ Project data. This paper is dedicated to the memory of Laura, our friend and colleague, who passed away shortly after the campaign.

Appendix A. Supplementary data

Supplementary data to this article can be found online at https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108384.

References

[1] M. Jantunen, E. Oliveira Fernandes, P. Carrer, S. Kephalopoulos, Promoting Actions for Healthy Indoor Air (IAIAQ), European Commission - Directorate General for Health and Consumers, 2011. http://ec.europa.eu/health/healthy_environments/docs/env_iaiaq.pdf.

[2] D.A. Sarigiannis, S.P. Karakitsios, A. Gotti, I.L. Liakos, A. Katsoyiannis, Exposure to major volatile organic compounds and carbonyls in European indoor environments and associated health risk, Environ. Int. 37 (4) (2011) 743–765, https://doi.org/10.1016/j.envint.2011.01.005.

[3] G. Boulanger, T. Bayeux, C. Mandin, S. Kirchner, B. Vergriette, V. Pernelet-Joly, P. Kopp, Socio-economic costs of indoor air pollution: a tentative estimation for some pollutants of health interest in France, Environ. Int. 104 (2017) 14–24, https://doi.org/10.1016/j.envint.2017.03.025.

[4] A. Johnson, E. Lucica, Survey on Indoor Use and Use Patterns of Consumer Products in EU Member States, Ipsos, 2012. https://esites.vito.be/sites/ephect/Working%20documents/EPHECT%20deliverables%20and%20documents/2.%20Assessing%20EU%20household%20uses%20for%20consumer%20product%20testing%20and%20risk%20assessment%20(WP5)/WP5%20Survey%20Report%20-%20Indoor%20Use%20and%20Use%20Patterns%20of%20Consumer%20Products%20final.pdf.

[5] C. Dimitroulopoulou, E. Lucica, A. Johnson, M.R. Ashmore, I. Sakellaris, M. Stranger, E. Goelen, I. Ephect, European household survey on domestic use of consumer products and development of worst-case scenarios for daily use, Sci. Total Environ. 536 (2015) 880–889, https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.05.036.

[6] E. Géhin, O. Ramalho, S. Kirchner, Size distribution and emission rate measurement of fine and ultrafine particle from indoor human activities, Atmos. Environ. 42 (35) (2008) 8341–8352, https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.07.021.

[7] W.W. Nazaroff, C.J. Weschler, Cleaning products and air fresheners: exposure to primary and secondary air pollutants, Atmos. Environ. 38 (18) (2004) 2841–2865, https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.02.040.

[8] B.C. Singer, H. Destaillats, A.T. Hodgson, W.W. Nazaroff, Cleaning products and air fresheners: emissions and resulting concentrations of glycol ethers and terpenoids, Indoor Air 16 (3) (2006) 179–191, https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2005.00414.x.

[9] S. Rossignol, C. Rio, A. Ustache, S. Fable, J. Nicolle, A. Même, B. D'anna, M. Nicolas, E. Leoz, L. Chiappini, The use of a housecleaning product in an indoor environment leading to oxygenated polar compounds and SOA formation: gas and particulate phase chemical characterization, Atmos. Environ. 75 (2013) 196–205, https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.03.045.

[10] C. Dimitroulopoulou, M. Trantallidi, P. Carrer, G.C. Efthimiou, J.G. Bartzis, Ephect II: exposure assessment to household consumer products, Sci. Total Environ. 536 (2015) 890–902, https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.05.138.

[11] A.J. Mehta, M. Adam, E. Schaffner, J.-C. Barthélémy, D. Carballo, J.-M. Gaspoz, T. Rochat, C. Schindler, J. Schwartz, J.-P. Zock, Heart rate variability in association with frequent use of household sprays and scented products in SAPALDIA, Environ. Health Perspect. 120 (7) (2012) 958–964, https://doi.org/10.1289/ehp.1104567.

[12] J.-P. Zock, E. Plana, D. Jarvis, J.M. Antó, H. Kromhout, S.M. Kennedy, N. Künzli, S. Villani, M. Olivieri, K. Torén, K. Radon, J. Sunyer, A. Dahlman-Hoglund, D. Norbäck, M. Kogevinas, The use of household cleaning sprays and adult asthma, Am. J. Respir. Crit. Care Med. 176 (8) (2007) 735–741, https://doi.org/10.1164/rccm.200612-1793OC.

[13] T. Weinmann, J. Gerlich, S. Heinrich, D. Nowak, E.v. Mutius, C. Vogelberg, J. Genuneit, S. Lanzinger, S. Al-Khadra, T. Lohse, I. Motoc, V. Walter, K. Radon, Association of household cleaning agents and disinfectants with asthma in young German adults, Occup, Environ. Med. (2017), https://doi.org/10.1136/oemed-2016-104086.

[14] N. Le Moual, R. Varraso, V. Siroux, O. Dumas, R. Nadif, I. Pin, J.P. Zock, F. Kauffmann, Domestic use of cleaning sprays and asthma activity in females, Eur. Respir. J. (2012), https://doi.org/10.1183/09031936.00197611.

[15] P. Wolkoff, T. Schneider, J. Kildeso, R. Degerth, M. Jaroszewski, H. Schunk, Risk in cleaning: chemical and physical exposure, Sci. Total Environ. 215 (1–2) (1998) 135–156, https://doi.org/10.1016/s0048-9697(98)00110-7.

[16] O. Dumas, N. Le Moual, Damaging effects of household cleaning products on the lungs, Expet Rev. Respir. Med. 14 (1) (2020) 1–4, https://doi.org/10.1080/17476348.2020.1689123.

[17] S. Prasad, J.C. Lipszyc, S.M. Tarlo, Update on effects of cleaning agents on allergy and asthma, LymphoSign Journal 5 (4) (2018) 121–129, https://doi.org/10.14785/lymphosign-2018-0013.

[18] R. Barouki, P.D. Gluckman, P. Grandjean, M. Hanson, J.J. Heindel, Developmental origins of non-communicable disease: implications for research and public health, Environ. Health 11 (1) (2012) 1–9, https://doi.org/10.1186/1476-069X-11-42.

[19] American Academy of Pediatrics (AAP) - Council on Environmental Health, Pediatric Environmental Health, fourth ed., Library of Congress, 2018.

[20] D. Missia, K. Tassosassos, J. Bartzis, V.S. Gabriela, d.O.F. Eduardo, C. Paolo, W. Peder, S. Marianne, G. Eddy, Literature Review on, Product Composition, Emitted Compounds and Emissions Rates and Health End Points from Consumer Products, University of Western Macedonia (UOWM), 2012. www.ephect.eu.

[21] I. Folletti, A. Siracusa, G. Paolocci, Update on asthma and cleaning agents, Curr. Opin. Allergy Clin. Immunol. 17 (2) (2017) 90–95, https://doi.org/10.1097/aci.0000000000000349.

[22] J.-P. Zock, D. Vizcaya, N. Le Moual, Update on asthma and cleaners, Curr. Opin. Allergy Clin. Immunol. 10 (2) (2010) 114–120, https://doi.org/10.1097/ACI.0b013e32833733fe.

[23] M. Trantallidi, C. Dimitroulopoulou, P. Wolkoff, S. Kephalopoulos, P. Carrer, Ephect III: health risk assessment of exposure to household consumer products, Sci. Total Environ. 536 (2015) 903–913, https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.05.123.

[24] A.W. Nørgaard, J.D. Kudal, V. Kofoed-Sørensen, I.K. Koponen, P. Wolkoff, Ozone-initiated VOC and particle emissions from a cleaning agent and an air freshener: risk assessment of acute airway effects, Environ. Int. 68 (2014) 209–218, https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.03.029.

[25] M.M. Rahman, K.-H. Kim, Potential hazard of volatile organic compounds contained in household spray products, Atmos. Environ. 85 (2014) 266–274, https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.12.001.

[26] R.T. Zaleski, P.P. Egeghy, P.J. Hakkinen, Exploring global exposure factors Resources for use in consumer exposure assessments, Int. J. Environ. Res. Publ. Health 13 (7) (2016) 26, https://doi.org/10.3390/ijerph13070744.

[27] European Centre for Ecotoxicology and Toxicology of Chemicals (ECETOC), Guidance for Effective Use of Human Exposure Data in Risk Assessment of Chemicals - Technical Report No. 126, 2016. https://www.ecetoc.org/wp-content/uploads/2016/11/ECETOC-TR-126-Guidance-for-Effective-Use-of-Human-Exposure-Data-in-Risk-Assessment-of-Chemicals.pdf.

[28] Association Internationale de la Savonnerie, de la Détergence et des Produits d'Entretien (Aise), TABLE OF HABITS AND PRACTICES FOR CONSUMER PRODUCTS IN WESTERN EUROPE, 2014.

[29] Association Internationale de la Savonnerie, de la Détergence et des Produits d'Entretien (Aise), SCEDs - Specific Consumer Exposure Determinants - A.I.S.E. Supporting Explanation, 2017.

[30] European Chemicals Agency (ECHA), Exposure Scenario for Chemical Safety Report and Communication - Example: Consumer Use of a Substance in Cleaning Products, 2011. https://echa.europa.eu/documents/10162/13564/es_for_consumer_20110829_en.pdf/9b4e6849-b2af-48ff-9994-9a0089158398.

[31] European Chemicals Agency (ECHA), Guidance on Information Requirements and Chemical Safety Assessment - Chapter R.15: Consumer Exposure Assessment, 2016. https://echa.europa.eu/documents/10162/13632/information_requirements_r15_en.pdf.

[32] M. Nicolas, L. Chiappini, B. D'Anna, Household Products Using and Indoor Air Quality : Emission, Reactivity and By-Products (ADOQ Project), Abstract in English, CTSB-INERIS-IRCELYON, 2013, https://www.primequal.fr/sites/default/files/adoq_english.pdf - https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/chiappini-nicolas-adoq-rf-1446454521.pdf.

[33] Centre de Recherche pour l'EtuDe et l'Observation des Conditions de vie (CREDOC), Les Français et les risques sanitaires associés aux produits ménagers et de soins du corps [The French and the health risks associated with household and body care products, French, 2009. www.credoc.fr.

[34] J. Ribéron, P. O'Kelly, MARIA: an Experimental Tool at the Service of Indoor Air Quality in Housing Sector, Indoor Air 2002 International Conference, Canada, Monterey, 2002.

[35] B. D'Anna, A. Meme, M. Nicolas, C. Rio, J. Nicolle, S. Rossignol, L. Chiappini, Household products and indoor air quality : emission, reactivity and byproducts in both gaseous and particulate phases, 14. International Conference on Indoor Air Quality and Climate (Indoor Air 2016), Ghent, Belgium, 2016.

[36] L. Chiappini, S. Rossignol, C. Rio, A. Ustache, S. Fable, J. Nicolle, M. Nicolas, Secondary Organic Aerosols Formation in Indoor Environment: the Role of Housecleaning Products, Pollution Atmosphérique, 2012, https://doi.org/10.4267/pollution-atmospherique.279.
[37] ISO 16000-6:2011: International Organization for Standardization (ISO), Indoor Air — Part 6: Determination of Volatile Organic Compounds in Indoor and Test Chamber Air by Active Sampling on Tenax TA Sorbent, Thermal Desorption and Gas Chromatography Using MS or MS-FID, 2011.
[38] ISO 16000-3:2011: International Organization for Standardization (ISO), Indoor Air — Part 3: Determination of Formaldehyde and Other Carbonyl Compounds in Indoor Air and Test Chamber Air — Active Sampling Method, 2011.
[39] B.C. Singer, B.K. Coleman, H. Destaillats, A.T. Hodgson, M.M. Lunden, C. J. Weschler, W.W. Nazaroff, Indoor secondary pollutants from cleaning product and air freshener use in the presence of ozone, Atmos. Environ. 40 (35) (2006) 6696–6710, https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.06.005.
[40] E. Garcia-Hidalgo, N. von Goetz, M. Siegrist, K. Hungerbuhler, Use-patterns of personal care and household cleaning products in Switzerland, Food Chem. Toxicol. 99 (2017) 24–39, https://doi.org/10.1016/j.fct.2016.10.030.
[41] S. Kirchner, J.-F. Arenes, C. Cochet, M. Derbez, C. Duboudin, P. Elias, A. Gregoire, B. Jédor, J.-P. Lucas, N. Pasquier, M. Pigneret, O. Ramalho, National Survey: Indoor Air Quality in French Dwellings. Abstract in English, Indoor Air Quality Observatory, OQAI), 2007.
[42] R.E. Moran, D.H. Bennett, D.J. Tancredi, X. Wu, B. Ritz, I. Hertz-Picciotto, Frequency and longitudinal trends of household care product use, Atmos. Environ. 55 (2012) 417–424, https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.03.021.
[43] M. Marbac, M. Sedki, M.-C. Boutron-Ruault, O. Dumas, Patterns of cleaning product exposures using a novel clustering approach for data with correlated variables, Ann. Epidemiol. 28 (8) (2018) 563–569, https://doi.org/10.1016/j.annepidem.2018.05.004, e6.
[44] United States Environmental Protection Agency (US EPA), Exposure Factors Handbook, 2011. http://ofmpub.epa.gov/eims/eimscomm.getfile?p_download_id=522996.
[45] G. Anthony, M. Corinne, R. Olivier, K. Séverine, Activités domestiques et produits d'usage courant utilisés par les ménages en France, Environ. Risques et St. (2013) 129–138, https://doi.org/10.1684/ers.2013.0603.
[46] J. Meesters, M. Nijkamp, A. Schuur, J. te Biesebeek, Cleaning Products Fact Sheet - Default Parameters for Estimating Consumer Exposure - ConsExpo 2015 Project, 2018. https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/2016-0179.pdf.
[47] J.D.t. Biesebeek, General Fact Sheet - General Default Parameters for Estimating Consumer Exposure - Updated Version 2014, 2014. Dutch National Institute for Public Health and the Environment (RIVM).
[48] W. Tirler, G. Settimo, Incense, sparklers and cigarettes are significant contributors to indoor benzene and particle levels, Annali dell'Istituto superiore di sanita 51 (1) (2015) 28–33.
[49] Agreed EU-LCI values – substances with their established EU-LCI values and summary fact sheets European Commission, https://ec.europa.eu/docsroom/documents/33642/attachments/1/translations/en/renditions/native, 2019. (Accessed 24 February 2020). Accessed.
[50] National Research Council (NRC), Risk Assessment in the Federal Government: Managing the Process, The National Academies Press, 1983.
[51] National Research Council (NRC), Science and Decisions: Advancing Risk Assessment, The National Academies Press, 2009.
[52] J.G.M. Van Engelen, G. Heinemeyer, C. Rodriguez, Consumer exposure scenarios: development, challenges and possible solutions, J. Expo. Sci. Environ. Epidemiol. 17 (2007) S26, https://doi.org/10.1038/sj.jes.7500577.
[53] T. Salthammer, The formaldehyde dilemma, Int. J. Hyg Environ. Health 218 (4) (2015) 433–436, https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2015.02.005.
[54] M. Spruyt, R. Bormans, F. Geyskens, D. Poelmans, L. Verbeke, E. Goelen, reportInfluence of Air Fresheners on the Indoor Air Quality, VITO Report 2006/MIM/R/0322006.
[55] O. Geiss, G. Giannopoulos, S. Tirendi, J. Barrero-Moreno, B.R. Larsen, D. Kotzias, The AIRMEX study-VOC measurements in public buildings and schools/kindergartens in eleven European cities: statistical analysis of the data, Atmos. Environ. 45 (22) (2011) 3676–3684, https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.04.037.
[56] TSD for Noncancer RELs December 2008 (Updated July 2014) - Appendix D Office of Environmental Health Hazard Assessment (OEHHA), Individual Acute, 8-Hour, and Chronic Reference Exposure Level Summaries, 2014, https://oehha.ca.gov/media/downloads/crnr/appendixd1final.pdf.
[57] P. Carrer, M. Trantallidi, S. Dimitroulopoulou, G. Efthimiou, I. Sakellaris, J. Bartzis, P. Wolkoff, Report on the Health Risk Associated with Emissions from Household Use of Selected Consumer Products, 2013. www.ephect.eu.
[58] M.J. Vincent, A. Parker, A. Maier, Cleaning and asthma: a systematic review and approach for effective safety assessment, Regul. Toxicol. Pharmacol. 90 (2017) 231–243, https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2017.09.013.
[59] A. Siracusa, F. Blay, I. Folletti, G. Moscato, M. Olivieri, S. Quirce, M. Raulf-Heimsoth, J. Sastre, S.M. Tarlo, J. Walusiak-Skorupa, J.-P. Zock, Asthma and exposure to cleaning products – a European Academy of Allergy and Clinical Immunology task force consensus statement, Allergy 68 (12) (2013) 1532–1545, https://doi.org/10.1111/all.12279.
[60] C. Ederle, C. Donnay, N. Khayath, M. Mielcarek, F. de Blay, Asthma and cleaning: what's new? Curr. Treat. Options Allergy 5 (1) (2018) 29–40, https://doi.org/10.1007/s40521-018-0153-9.
[61] Ø. Svanes, R.J. Bertelsen, S.H.L. Lygre, A.E. Carsin, J.M. Antó, B. Forsberg, J. M. García-García, J.A. Gullón, J. Heinrich, M. Holm, M. Kogevinas, I. Urrutia, B. Leynaert, J.M. Moratalla, N.L. Moual, T. Lytras, D. Norbäck, D. Nowak, M. Olivieri, I. Pin, N. Probst-Hensch, V. Schlünssen, T. Sigsgaard, T.D. Skorge, S. Villani, D. Jarvis, J.P. Zock, C. Svanes, Cleaning at home and at work in relation to lung function decline and airway obstruction, Am. J. Respir. Crit. Care Med. 197 (9) (2018) 1157–1163, https://doi.org/10.1164/rccm.201706-1311OC.
[62] [dataset] Joint Research Center (JRC), Data of the AIRMEX Project - European Indoor Air Monitoring and Exposure Assessment Project, 2007, https://ipchem.jrc.ec.europa.eu/RDSIdiscovery/ipchem/index.html#showmetadata/AIRMEX.
[63] A.M. Zarogianni, G. Loupa, S. Rapsomanikis, Fragrances and aerosol during Office cleaning, Aerosol Air Qual. Res. 18 (5) (2018) 1162–1167, https://doi.org/10.4209/aaqr.2017.08.0270.
[64] L. Morawska, A. Afshari, G.N. Bae, G. Buonanno, C.Y.H. Chao, O. Hänninen, W. Hofmann, C. Isaxon, E.R. Jayaratne, P. Pasanen, T. Salthammer, M. Waring, A. Wierzbicka, Indoor aerosols: from personal exposure to risk assessment, Indoor Air 23 (6) (2013) 462–487, https://doi.org/10.1111/ina.12044.
[65] C.D. Klaassen, Casarett & Doull's Toxicology: the Basic Science of Poisons, ninth ed., McGraw-Hill Education, 2018.
[66] D.E. Schraufnagel, The health effects of ultrafine particles, Exp. Mol. Med. (2020), https://doi.org/10.1038/s12276-020-0403-3.
[67] S. Jun, K. Drall, B. Matenchuk, C. McLean, C. Nielsen, C.V. Obiakor, A. Van der Leek, A. Kozyrskyj, Sanitization of early life and microbial dysbiosis, Challenges 9 (2) (2018) 43, https://doi.org/10.3390/challe9020043.
[68] M.H. Tun, H.M. Tun, J.J. Mahoney, T.B. Konya, D.S. Guttman, A.B. Becker, P. J. Mandhane, S.E. Turvey, P. Subbarao, M.R. Sears, J.R. Brook, W. Lou, T. K. Takaro, J.A. Scott, A.L. Kozyrskyj, Postnatal exposure to household disinfectants, infant gut microbiota and subsequent risk of overweight in children, Can. Med. Assoc. J. 190 (37) (2018) E1097–E1107, https://doi.org/10.1503/cmaj.170809.

L’article suivant est présenté et analysé à la section 2.C.

Karr G, Quivet E, Ramel M et al. Sprays and diffusers as indoor air fresheners: Exposure and health risk assessment based on measurements under realistic indoor conditions. Indoor Air 2021; 00(1-11). DOI : https://doi.org/10.1111/ina.12923.

Received: 9 December 2020 | Revised: 8 July 2021 | Accepted: 6 August 2021

DOI: 10.1111/ina.12923

ORIGINAL ARTICLE

WILEY

Sprays and diffusers as indoor air fresheners: Exposure and health risk assessment based on measurements under realistic indoor conditions

Guillaume Karr[1] | Etienne Quivet[2] | Martine Ramel[1] | Mélanie Nicolas[3]

[1]Ineris (French National Institute for Industrial Environment and Risks), ISAE, Verneuil-en-Halatte, France

[2]Aix Marseille Univ, CNRS, LCE, Marseille, France

[3]CSTB (Scientific and Technical Center for Building), Pollem, Saint Martin d'Hères, France

Correspondence
Guillaume Karr, Ineris (French National Institute for Industrial Environment and Risks), ISAE, Verneuil-en-Halatte 60550, France.
Email: guillaume.karr@ineris.fr

Funding information
Ministère français en charge de l'Environnement; Agence de la transition écologique

Abstract

Noncombustible air fresheners are indoor air emission sources of concern. The associated health risks should be better understood. Based on 15 products (4 sprays, 6 passive diffusers, and 5 active diffusers), the health risk assessment (HRA) approach was applied to a national use survey in France and to concentrations measured in an experimental house. The targeted substances included volatile organic compounds (VOCs), carbonyls, and fine particles ($PM_{2.5}$). Mean-use and reasonable worst-case generic scenarios were designed. No situation of concern occurred regarding chronic exposure associated with the mean use. Under the reasonable worst-case scenarios, the chronic risk could exceed selected health reference standards, mainly for acrolein (average inhaled concentration (AIC) up to 3.5 $\mu g/m^3$), benzene (AIC up to 4 $\mu g/m^3$), and limonene (AIC up to 8 mg/m^3). The acute exposure, defined as a 1-h exposure, could exceed selected health standards, primarily for acrolein (up to 23 $\mu g/m^3$) and formaldehyde (up to approximately 370 $\mu g/m^3$). Furthermore, the 1-h average $PM_{2.5}$ concentration, including ultrafine particles, could exceed 100 $\mu g/m^3$, typically for sprays. These results suggest that the highest exposures should be reduced and, as such, that the emissions of the highest-emissivity products should be lowered.

KEYWORDS
air fresheners, diffusers, emission sources, health risk assessment, indoor air, sprays

1 | INTRODUCTION

In temperate climates, most people spend nearly 90% of their time in indoor environments, mainly at home. Consequently, the indoor air quality is a topic of major importance for public health.[1-3]

Noncombustible air fresheners, such as sprays and diffusers (ie, not burning incenses or scented candles), are commonly applied consumer products. These products can be specific indoor emission sources of air pollutants, for example, formaldehyde, particles, and terpenes,[4-7] and are a subject of concern.[6-9] The associated risks should be better understood.[7,10] In particular, only a few health risk assessment (HRA) studies have been conducted, generally studying a limited number of products and substances based on models and laboratory measurements carried out in emission test chambers.[6,11-15]

This study aimed to contribute to a better characterization of the exposure and risk levels associated with the household use of noncombustible air fresheners: an HRA was conducted on fifteen noncombustible air fresheners of various types based on measurements under realistic indoor conditions (i.e., under environmental

© 2021 John Wiley & Sons A/S. Published by John Wiley & Sons Ltd

parameters that can be found in real indoor environments). In particular, this HRA aimed to identify the emitted substances of the highest concern and to assess the associated health issues.

Practical implications

- This study provides evidence that exposure to noncombustible air fresheners may lead to situations of concern.
- The highest risk may be associated with exposure to acrolein, benzene, limonene, formaldehyde, and fine particles ($PM_{2.5}$).
- Chronic and acute calculated exposures are provided for these priority substances of concern.
- Exposures may be highly reduced by reasonable use, room ventilation after use, and direct inhalation avoidance.
- The obtained results suggest that the emissions of high-emissivity products should be reduced to ensure safe use.

2 | METHODS

2.1 | Experiments under realistic indoor conditions

Fifteen noncombustible air fresheners were selected from different manufacturers and sellers. All products are available and can be used by consumers. The selected products included 4 sprays, 6 passive diffusers, and 5 active diffusers. In this study, passive and active indicate the absence and use, respectively, of a source of energy.

The emissions from the above-selected products were measured in the Mechanized house for Advanced Research on Indoor Air (MARIA; Scientific and Technical Center of Building [CSTB], Marne-la-Vallée, France).[16] The room where the measurements were carried out corresponded to a 32-m^3 bedroom (See details in Supplementary Information 1 "Room description"). This room did not contain furniture, and the finishing coatings were minimal: raw concrete floor, painted plasterboard walls, and painted concrete ceiling. All experiments were conducted under one set of environmental parameters that can be found in real indoor environments. The indoor air conditions of the room, for example, the temperature (17 ± 1)°C and relative humidity (38 ± 3)%, were continuously monitored. The air change rate (ACR) was controlled and maintained by the means of mechanical ventilation system and the resulting ACR was (0.45 ± 0.03)/h.

Indoor air samples were collected at the extraction equipment. Consequently, the corresponding air is assumed to reflect the average concentration in the room.

A detailed physicochemical characterization of the emissions was performed using online instrumentation and off-line chemical analysis of the gaseous phase (See details in Supplementary Information 1 "Sampling" and "Analysis").

After reviewing the scientific literature[5-11] and pretesting in emission test chambers, the selected targeted substances included:

- Volatile organic compounds (VOCs), including benzene, toluene, ethylbenzene, styrene, xylenes, naphthalene, limonene, and alpha-pinene;
- Carbonyl compounds, including formaldehyde, acetaldehyde, acetone, propionaldehyde, benzaldehyde, and acrolein;
- Particulate matter, including particles with an aerodynamic diameter of less than 10 microns (PM_{10}) and fine particles ($PM_{2.5}$).

Semi-volatile organic compounds (SVOCs) were not in the scope of this HRA.

Due to the technical limitations of the various existing techniques, three different approaches were selected to quantify volatile organic compounds (VOCs) and carbonyls compounds: VOCs including benzene, toluene, styrene, formaldehyde, acetaldehyde, acetone, and acrolein were monitored online using a proton transfer reaction-time of flight-mass spectrometer (PTR-ToF-MS 8000; Ionicon Analytik GmbH). Other carbonyl compounds, including propionaldehyde and benzaldehyde, were collected on DiNitroPhenylHydrazine (DNPH) coated cartridges (Waters) and quantified using HPLC-DAD (Alliance, Waters) after liquid extraction with 5 ml of acetonitrile.[17] Other VOCs, including ethylbenzene, xylenes, naphthalene, limonene, and alpha-pinene, were collected on Tenax TA sorbent tubes (Perkin Elmer), extracted by thermal desorption (Turbomatrix, Perkin Elmer), and analyzed using GC/MS (SQ8S Perkin Elmer).[18]

Particles were monitored using a scanning mobility particle sizer (SMPS, model 3936, TSI—from 10 nm to 807 nm) and an optical particle counter (OPC, model 1.109; GRIMM Aerosol Technik GmbH—from 260 nm to 32 μm).

All the results obtained are available in Supplementary Information 2 "Field measurement data."

2.2 | Design of the generic exposure scenarios

A survey on the household use of sprays and diffusers was conducted in September 2017 by the French Ministry of Environment.[19] The survey consisted of interviews carried out via self-administered online questionnaires. These interviews were conducted on a sample of approximately 1500 people, representative of the French population over the age of 18. This representativeness was obtained by the quota sampling method (sex, age, and occupation) after stratification by region and by the urban area category.

Based on the results of this national survey, two types of generic exposure scenarios were designed. The mean-use scenarios aimed to characterize a user with common practices (e.g., frequency and duration of use) and environmental characteristics (e.g., room volume, air change rate), based on the average of the observed practices and characteristics. Typically, the components of these scenarios were chosen from the 50th percentiles of the responses

collected in the national survey. The reasonable worst-case scenarios aimed to characterize a user whose practices and environmental characteristics reasonably increase the average exposure. Typically, the components of these scenarios were chosen from the 90th percentiles of the responses collected in the national survey.

When the national survey did not provide enough information to select a value for certain components of the considered scenarios, the values determined in the European EPHECT project[20,21] were selected.

Each scenario was defined by several components: frequency of use in and volume of each room where noncombustible air fresheners are used (units: /d and m^3, respectively), air change rate (/h), daily presence in the rooms where the products are used (h/d), duration of exposure over a lifetime (years), potential manual ventilation of the room (i.e., a user opens a window to temporarily increase the ventilation), during or after air freshener use (yes/no), and duration of use (for sprays: number of sprayings, dimensionless, and duration of each spraying, s; for diffusers used continuously: months/year; for diffusers used sporadically: min per use).

2.3 | Exposure assessment

The results of the national survey revealed that noncombustible air fresheners were used in several rooms at home. Consequently, a house with seven types of rooms was considered in the HRA: kitchen, bedroom, bathroom, living/dining room, restroom (WC), entrance hall, and storeroom. The corresponding considered characteristics (Table 1) approximately conform to those adopted in other European studies, including the HRA of the EPHECT project (considered population groups: housekeepers and retired people).[21,22]

The results of the field measurements consisted of the average concentration during several successive periods, depending on the type of emission pattern considered, but typically during the 3 h 30 min following the beginning of use (see details in Supplementary Information 1 "Sampling"). These concentrations were extrapolated to daily average concentrations based on the following hypotheses: (i) for mean-use scenarios, 10 min of manual ventilation renews the air in a room[23] (the measured concentrations are considered until the manual ventilation, and then, the corresponding flush with outdoor air enables to reach the outside background concentrations); (ii) for reasonable worst-case scenarios, the concentration in a room is supposedly decreasing only with the selected air change rate (no manual ventilation; mass balance approach). Under each scenario and for each emitted substance, these hypotheses allowed us to extrapolate the measured concentrations to concentrations at any time of the day in any room. The daily average concentrations were then calculated for each room.

TABLE 1 Volume and daily presence in each room considered in the health risk assessment

Rooms	Volume (m^3)	Daily presence (h/d)
Kitchen	30	2.75
Bedroom	45	8.5
Bathroom	24	1
Living/Dining room	90	5.75
Restroom (WC)	5	0.5
Entrance hall	12	0.5
Storeroom	10	0.5

Sorption/desorption phenomena and migration within the house were not quantified, assuming the associated variability is much lower than the uncertainties associated with the other assumptions of the HRA.

Based on the above daily average concentration data, the average inhaled concentrations (AICs) were calculated by considering the components of each generic exposure scenario: frequency of use, daily presence in each room, duration of use, etc. For each emitted substance, the AICs of each room were summed to obtain the characteristic AIC of the average daily presence in the considered house (AIC_{house} - 24 h time-weighted average) (Table 1). These calculated AIC_{house} values characterized the chronic inhalation exposure.

The acute exposure level was also assessed. In general, this type of exposure corresponds to periods that may vary between 1 h and a few days. Considering the uses described in the national survey, an exposure duration of 1 h was adopted in the HRA. Therefore, the acute exposure level was characterized by the maximum 1-h average concentration (HAC_{max}), combining the maximum measured (sprays) or expected (diffusers) concentrations with the characteristics of the considered house (volumes and daily presences detailed in Table 1).

2.4 | Selection of the toxicity values

Regarding both chronic and acute effects, a choice of toxicological reference values (TRVs) was made for each tested substance from among the TRVs reported in common reference databases, such as the United States Environmental Protection Agency (US EPA), World Health Organization (WHO), Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR), French Agency for Food, Environmental and Occupational Health & Safety (ANSES), Health Canada, Dutch National Institute for Public Health and the Environment (RIVM), and California Office of Environmental Health Hazard Assessment (OEHHA). This choice was made in regard to the threshold effect (TRV_T - $\mu g/m^3$), nonthreshold effect (TRV_{NT} - /[$\mu g/m^3$]), and acute effect (TRV_{acute} - $\mu g/m^3$). Considering that HAC_{max} was selected to characterize the acute exposure level, the TRVs associated with a 1-h exposure duration were preferentially chosen.

2.5 | Health risk assessment

Based on the exposure levels calculated from the concentrations measured under realistic indoor conditions and with the generic

exposure scenarios designed from the national survey, an HRA was conducted.

The scope of this HRA only included the inhalation route of exposure. The chronic threshold and nonthreshold risks, as well as the acute risk, were quantified by the following risk indicators: threshold effect ratio (TER), individual excess risk (IER), and acute risk ratio (ARR), respectively.

$$TER = \frac{AIC_{house}}{TRV_T} \quad (1)$$

$$IER = \frac{AIC_{house} \times TRV_{NT} \times \text{Years of exposure}}{\text{Lifetime of 70 years}} \quad (2)$$

$$ARR = \frac{HAC_{max}}{TRV_{acute}} \quad (3)$$

To be conservative, in coherence with the results of the national survey, the HRA considered a lifetime exposure (ie, a ratio "Years of exposure / Lifetime of 70 years" equal to 1).

3 | RESULTS

3.1 | Elaboration of the generic exposure scenarios

The main general findings of the national survey on household exposure include the following: *The use of noncombustible air fresheners is widespread: more than two-thirds of French people use sprays in their homes, almost half use passive diffusers and more than one-third use active diffusers; uses are well anchored in usual practices*; 13% of spray users and 37% of diffuser users report that children may be present in the rooms where noncombustible air fresheners are used; 65% of French people report that the use of noncombustible air fresheners improves or does not affect the indoor air quality; 40% of spray users, 40% of passive diffuser users, and 50% of active diffuser users apply these products aiming to clean the indoor air.

The national survey also provided detailed results that enabled us to elaborate two generic exposure scenarios for each type of noncombustible air freshener considered in the HRA (Table 2).

3.2 | Exposure assessment

Under each exposure scenario, a AIC_{house} was calculated for each quantified substance emitted by each tested product (Tables S30 and S31). Table 3 presents an overview of the obtained results (Minimum, Maximum, Median, and Average data) for a selection of usual substances of interest.

Furthermore, a HAC_{max} was calculated for each quantified substance emitted by each tested product. Table 4 provides an overview of the obtained results for a selection of usual substances known for their potential acute effects.

3.3 | Selection of the toxicity values

For each substance tested in the experimental house, TRV values were selected. Table 5 presents the TRVs adopted for a selection of substances of interest and their associated critical effects.

No TRV was available for limonene and alpha-pinene in the consulted databases. Consequently, in regard to chronic exposure, the derived European lowest concentrations of interest (EU-LCI), determined with a method similar to the one used for the TRV values, were considered for informative purposes only. These EU-LCIs are equal to 2.5 mg/m^3 (alpha-pinene) and 5 mg/m^3 (limonene).

No TRV was also available for PM_{10} and $PM_{2.5}$ in the consulted databases. Consequently, WHO ambient air quality guideline values were considered for the chronic and acute effects, that is, 20 and 50 $\mu g/m^3$, respectively, for PM_{10}; 10 and 25 $\mu g/m^3$, respectively, for $PM_{2.5}$. However, these guidelines are not TRVs (and acute effects correspond to a 24 h-period): they are considered for informative purposes only.

3.4 | Chronic risk assessment

For each substance emitted by each tested product and under each generic exposure scenario, TER and IER values were calculated (Tables S30 and S31) when TRV_T and TRV_{NT} values, respectively, were available. The main obtained results are presented below.

3.4.1 | Mean-use scenarios

For each quantified emitted substance considered individually, no TER nor IER value exceeded the usual reference values of 1 and 10^{-5} (1-in-100 000 lifetime cancer risk), respectively. Furthermore, for each product, the multisubstance sums of the TER and IER values did not exceed these usual reference values.

3.4.2 | Reasonable worst-case scenario—spray users

The acrolein TER value generally exceeded the reference value, ranging from 1.1 to 24. Furthermore, several $PM_{2.5}$ exposure levels exceeded the WHO guideline (10 $\mu g/m^3$), ranging from 30 to 60 $\mu g/m^3$.

Several benzene IER values exceeded the reference value, ranging from $4.0.10^{-5}$ to $7.2.10^{-5}$.

3.4.3 | Reasonable worst-case scenario—passive diffuser users

Several acrolein TER values exceeded the reference value, ranging from 1.3 to 1.5. One benzene IER value exceeded the reference value, equal to $2.5.10^{-5}$.

TABLE 2 Generic exposure scenarios designed in the health risk assessment based on the results of a national survey on noncombustible air freshener use

Scenarios components		Spray users		Passive diffuser users		Active diffuser users	
		Reasonable worst case	Mean use	Reasonable worst case	Mean use	Reasonable worst case	Mean use
Frequency of use (/d)	Restroom (WC)	6	1.5	Continuous	Continuous	Continuous	—
	Living/Dining room	2.5	0.1		—		0.43
	Kitchen	2.5	0.1		—		—
	Entrance hall	1.5	0.03		—		—
	Bathroom	1.5	0.03		—		—
	Bedroom(s)	1	0.01		—		—
	Other room(s)	0.43	0.01		—		—
Duration of use		Number of sprayings		Number of months per year (continuous use)		Number of months per year (continuous use)	Duration of each use (min)
		4	2				
		Duration of each spraying (s)		11	10	11	40
		2	1				
Presence in the room during and after use		Yes	Leaving the room after use, may return after 30′	Yes	Yes	Yes	Yes
Years of exposure (years)		70	70	70	70	70	70
Manual ventilation (opening to the outside)		No manual ventilation	3 times/4: 10′ opening, 20′ after use. 1 time/4: no manual ventilation	No manual ventilation	10′ each day	No manual ventilation	10′ and 30′ after use
Air change rate (/h)		0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35

TABLE 3 Chronic exposure levels for a selection of substances of interest - average inhaled concentration (AIC - µg/m^3) under the reasonable worst-case scenarios

Substances	CAS number	Spray users				Passive diffuser users				Active diffuser users			
		Min.	Max.	Med.	Avg.	Min.	Max.	Med.	Avg.	Min.	Max.	Med.	Avg.
Formaldehyde	50-00-0	0.31	52	37	30	0.01	57	2.2	13	0	45	1.6	8.4
Acetaldehyde	75-07-0	0.82	84	12	30	0	63	0.44	8.7	0	46	0.47	7.6
Limonene	5989-27-5	3.1	2220	427	591	0	97	1.1	17	0	7981	56	1006
Acetone	67-64-1	5.6	120	55	51	0	8.9	0.006	2.1	0	40	5.3	5.1
Acrolein	107-02-8	0.17	3.5	1.1	1.3	0	0.22	0	0.05	0	0.54	0.01	0.12
$PM_{2.5}$	–	0	62	19	25	0	0	0	0	0	24	0.88	4.3
Benzene	71-43-2	0	2.8	0.9	1.2	0	0.97	0	0.14	0	4	0.07	0.61

Abbreviations: 0, measured concentrations equaled background concentrations; Avg., average; Max., maximum; Med., median; Min., minimum.

3.4.4 | Reasonable worst-case scenario—active diffuser users

One acrolein TER value exceeded the reference value, equal to 3.6. Furthermore, two $PM_{2.5}$ exposure levels exceeded the WHO guideline (10 µg/m^3), equal to 13 and 24 µg/m^3, and several limonene exposure levels exceeded the corresponding EU-LCI, up to a factor of 1.6.

Several benzene IER values exceeded the reference value, ranging from $7.3.10^{-5}$ to $1.0.10^{-4}$.

3.5 | Acute risks assessment

For each substance emitted by each tested product, an ARR value was calculated (Table S32) when TRV_{acute} was available. The main obtained results are presented below.

3.5.1 | Spray users

Two acrolein ARR values exceeded the reference value, equal to 2.6 and 3.3, while several formaldehyde ARR values exceeded the reference value, ranging from 1.7 to 2.3. Furthermore, several $PM_{2.5}$ exposure levels exceeded the WHO guideline value (25 µg/m^3, 24 h-exposure), ranging from 130 to 180 µg/m^3.

3.5.2 | Passive diffuser users

Two formaldehyde ARR values exceeded the reference value, equal to 3.0 and 3.7.

3.5.3 | Active diffuser users

Two formaldehyde ARR values exceeded the reference value, equal to 2.3 and 2.9. Furthermore, several $PM_{2.5}$ exposure levels exceeded the WHO guideline value (25 µg/m^3, 24 h-exposure), ranging from 35 to 190 µg/m^3.

Furthermore, for all tested products, the maximum alpha-pinene HAC_{max} value was 2.8 mg/m^3, and the maximum limonene HAC_{max} value was 52 mg/m^3, which are below the acute critical exposure limits (CELs) determined in the EPHECT project,[11] that is, at 45 and 90 mg/m^3, respectively.

4 | DISCUSSION

4.1 | Elaboration of the generic exposure scenarios

The national survey allowed us to establish generic exposure scenarios for the considered noncombustible air fresheners. However, a substantial variety of products exists within the spray, passive

TABLE 4 Calculated acute exposure levels for a selection of substances of interest - maximum 1-h average concentration (μg/m^3)

		Spray users				Passive diffuser users				Active diffuser users			
Substances	**CAS number**	**Min.**	**Max.**	**Med.**	**Avg.**	**Min.**	**Max.**	**Med.**	**Avg.**	**Min.**	**Max.**	**Med.**	**Avg.**
Formaldehyde	50-00-0	0.92	230	110	110	0.06	370	15	84	0	290	5.8	49
Acetaldehyde	75-07-0	2.9	355	63	120	0	411	2.8	57	0	298	2.4	50
Acrolein	107-02-8	0.53	23	2.8	6.7	0	1.5	0	0.3	0	3.5	0.27	0.91
Particles $PM_{2.5}$	—	0	180	76	76	0	0	0	0	0	190	5.7	39
Benzene	71-43-2	0	7.2	2.3	3	0	6.3	0	0.93	0	21	0.97	4.2

Abbreviations: 0, measured concentrations equaled background concentrations; Avg., average; Max., maximum; Med., median; Min., minimum.

diffuser, and active diffuser general categories. For certain tested products, the description and recommendation of the manufacturers did not precisely fit the established scenarios. For example, the use could be associated with a laptop USB port, which does not fit well with the use in a bathroom or restroom (WC). Additionally, recommendations could strongly focus on sporadic use, for example, "*30 min before your child goes to bed*," which does not suitably conform to the continuous use under the reasonable worst-case scenario established for active diffusers. Consequently, when reasonably feasible, the generic exposure scenarios were adapted in this study for certain products to compensate for the above limitation.

4.2 | Exposure assessment

To our knowledge, this HRA is the first to combine measurements under realistic indoor conditions and the results of a national survey on the use of noncombustible air fresheners.

The exposure levels were calculated from the concentrations measured under a set of realistic indoor conditions, over approximately 3 h 30 min following the beginning of use. These field concentrations allowed us to consider the secondary substances formed in the indoor air during the measurement periods. This secondary formation could represent a major contribution to the measured concentrations, as observed for the secondary formation of formaldehyde[5,24,25] that occurs indoors through chemical reactions between, for example, ozone and terpenes. The measured field concentrations also allowed us to avoid the difficulties of the simulation of real emissions processes in a laboratory test chamber. These difficulties include the assumption of various parameters, for example, humidity rate (water content of air, %RH), oxygen rate (oxygen content of air, %), air flow rate (air volume entering chamber per time), and temperature.[26] Furthermore, the Surface/Volume ratio could favor sorption phenomena and could lead to underestimated concentrations.

The main limitations associated with the AIC determination consist of the rather simple assumptions chosen to extrapolate the measured concentrations. However, this approach has been applied in previous studies.[5]

The exposure levels associated with the use of noncombustible air fresheners have been assessed in other studies.[6,14,15,27-32] These studies were based on other hypotheses, other types of measurements and other methods. The main identified differences are related to the use of emission data measured in test chambers, the use of models to estimate exposure, the selected products (a great variability in emissions has been observed within the same type of noncombustible air freshener),[8,10] the selected air change rate and volume of the room where noncombustible air fresheners are used, the location of the measuring instrumentation, for example, the distance to the tested product, and the availability of detailed information on the practices of the considered users.

Consequently, the corresponding exposure levels could not be directly compared to those determined in this study. However, no obvious inconsistency was identified. Furthermore, the determined maximum chronic and acute exposure levels frequently exceeded the values reported in the scientific literature, especially for formaldehyde (the acute exposure levels are below 100 μg/m^3 in the scientific literature).

4.3 | Chronic and acute risk characterization

The obtained results under the mean-use scenarios suggest that the chronic exposure levels associated with the most common use patterns are not of concern, with regard to the targeted substances, the selected products and the assumptions made in this HRA.

The exceedances determined under the reasonable worst-case scenarios suggest that the highest chronic exposure levels should be reduced, especially for acrolein and benzene. However, the associated maximum chronic exposure levels—3.5 and 4 μg/m^3, respectively—correspond to background concentrations reported in certain private dwellings.[33,34]

Moreover, the exceedances determined for the acute exposure to acrolein and formaldehyde suggest a need to reduce the emissions of the highest-emissivity products.

The acrolein acute exposure levels (up to 23 μg/m^3) can also be compared to the OEHHA acute reference exposure level (2.5 μg/m^3, 1 h, respiratory and eye irritation, 2008) and to the acute critical exposure limit established in the EPHECT project (21 μg/m^3, 30 min, subjective eye irritation, 2015).

Furthermore, since the indoor air samples were collected with air extraction equipment in the test room, the measured concentrations

TABLE 5 Values characterizing the toxicity of several substances of interest

CAS number	Substances	TRV_T ($\mu g/m^3$)	Org.	Date	TRV_{NT} ($\mu g/m^3$)$^{-1}$	Org.	Dated	TRV_{acute} ($\mu g/m^3$)	Org.	Date	Critical effects
50-00-0	Formaldehyde	—	—	—	—	—	—	$1.0.10^2$	WHO	2010	Acute: Subjective and objective eye irritation
75-07-0	Acetaldehyde	$1.6.10^2$	ANSES	2014	—	—	—	$3.0.10^3$	ANSES	2014	Threshold: Degeneration of the olfactory epithelium Acute: Bronchoconstriction in individuals with asthma
107-02-8	Acrolein	$1.5.10^{-1}$	ANSES	2019	—	—	—	6.9	ATSDR	2007	Threshold: Lesions of the upper respiratory epithelium Acute: Nasal and throat irritation, decreased respiratory rate
108-88-3	Toluene	$2.0.10^4$	ANSES	2018	—	—	—	$2.0.10^4$	ANSES	2018	Threshold: Neurological effects (color vision disorders) Acute: Neurological effects
91-20-3	Naphthalene	1.10^1	WHO	2013	$5.6.10^{-6}$	ANSES	2013	—	—	—	Threshold: Lesions of the respiratory and olfactory epithelium Nonthreshold: Neuroblastomas of the olfactory epithelium
50-32-8	Benzo(a)pyrene	$2.0.10^{-3}$	USEPA	2017	$6.0.10^{-4}$	US EPA	2017	—	—	—	Threshold: Increased fetal embryonic mortality Nonthreshold: Occurrence of respiratory tumors
71-43-2	Benzene	$1.0.10^1$	ANSES	2010	$2.6.10^{-5}$	ANSES	2013	$2.7.10^1$	OEHHA	2014	Threshold: Immunological disorders Nonthreshold: Acute leukemia Acute: Reproductive disorders, aplastic anemia, and acute myeloid leukemia

Note: TRV_T is the threshold toxicological reference value, for the inhalation route and chronic exposure; TRV_{NT} is the nonthreshold toxicological reference value, for the inhalation route and chronic exposure; TRV_{acute} is the acute toxicological reference value for the inhalation route; Date is the date of construction or the date of last revision; Org. is the producing organization.

were lower than those occurring close to the products. Consequently, the actual acute exposure levels may be much higher than those assessed in this HRA, thus supporting the identified need to reduce the emissions of high-emissivity products.

In the scientific literature, few HRAs have been conducted targeting noncombustible air fresheners.[6,14,32] These assessments have concluded that no situation of concern is typically expected. This difference with the conclusions of this HRA can be explained by the differences in the selected toxicity values and by the higher maximum exposure levels determined in the present study. However, other types of studies have concluded that exposure to noncombustible air fresheners could be of concern: the measured concentrations could exceed the thresholds associated with the exacerbation of existing symptoms in people with asthma,[27,35,36] and certain epidemiological studies have identified a significant association between the use of some air fresheners and respiratory disorders during the first years of life,[37] a higher risk of breast cancer[38] and a short-term decrease in lung ventilation capacity,[39] while toxicological studies have reported a significant association between the application of certain air fresheners and inflammatory phenomena in rats,[40] neurobehavioral effects in rats,[41] and adverse effects on the liver cells in young rats.[42] A literature review demonstrated a significant association between the use of noncombustible air fresheners and certain health effects (disorders of the respiratory system) but no causal relation was identified,[25] and other reviews indicated that the available data are insufficient to draw conclusions on the potential health effects associated with aerosol sprays[43] and essential oil air fresheners,[44] while a European collective expert assessment concluded that certain noncombustible air fresheners may cause or aggravate symptoms in highly sensitive persons and may be of concern in children.[8] Surveys conducted in five industrialized countries (the United States of America, United Kingdom, Germany, Australia, and Sweden) indicated that 15% to 20% of people have reported health effects, for example, headaches or breathing difficulties, associated with the use of noncombustible air fresheners.[7,45,46]

The results of this HRA contribute to the existing body of evidence.

4.4 | Priority substances of interest

Based on all the calculated risk indicators, the substances of highest interest identified in the HRA are acrolein, benzene, $PM_{2.5}$, formaldehyde, and, to a lesser extent, limonene.

These substances are not specific to the emissions of noncombustible air fresheners. Other emission sources are commonly present in indoor environments, for example, furniture, cleaning products, tobacco smoke, construction products, paints, and cooking fumes. Consequently, cumulative exposure is expected, which could lead to higher risks than those identified for each source, considered individually. Background exposure levels in European private dwellings are available for several of the above-identified priority substances[21,33,47]: formaldehyde (minimum: 7 $\mu g/m^3$; maximum: 57 $\mu g/m^3$; mean: 22 $\mu g/m^3$); benzene (minimum: 0 $\mu g/m^3$; maximum: 32 $\mu g/m^3$; mean: 3 $\mu g/m^3$); and limonene (minimum: 0 $\mu g/m^3$; maximum: 493 $\mu g/m^3$; mean: 29 $\mu g/m^3$). The health reference values selected in this HRA, and those considered in the Section 4, relate to the total indoor air concentration: they do not relate to the concentration attributable to the use of noncombustible air fresheners only. This suggests a need to limit the emissions of noncombustible air fresheners, especially for the identified priority substances of interest, until the corresponding concentrations are much lower than the selected health values.

4.5 | Emitted particles

The chronic and acute $PM_{2.5}$ exposure levels could exceed the WHO guideline values, especially for sprays, which may indicate potential situations of concern. However, since the composition of the particles emitted by noncombustible air fresheners likely greatly differs from the composition of the ambient air particles considered in the WHO guideline values, the associated risks cannot be precisely characterized. Further studies are required to evaluate whether situations of concern are expected.

However, a portion of the $PM_{2.5}$ particles emitted by the tested noncombustible air fresheners were submicron particles (PM_1), even ultrafine particles ($PM_{0.1}$), which is consistent with the results of other studies[25,48-50] and certain descriptions of manufacturers. For example, a spray and an active diffuser yielded a 1-h PM_1 concentration in excess of 3 $\mu g/m^3$; singularly among the tested products, one active diffuser (atomizer) resulted in a 1-h PM_1 concentration of approximately 88 $\mu g/m^3$. These submicron particles are a subject of concern because of their high surface reactivity and ability to penetrate the pulmonary system.[51,52]

5 | CONCLUSIONS

The HRA approach was applied to better understand the health risks associated with noncombustible air fresheners, thereby identifying the emitted substances of highest concern and evaluating the associated risks.

Fifteen noncombustible air fresheners including 4 sprays, 6 passive diffusers, and 5 active diffusers were tested in an experimental house under realistic indoor conditions.

Based on a national survey on air freshener use in France, conducted in 2017 by the French Ministry of Environment, two types of generic exposure scenarios were designed, namely, mean-use scenarios, and reasonable worst-case scenarios.

To our knowledge, this HRA is the first to combine concentrations measured under realistic indoor conditions and the results of a national use survey.

The obtained results under the mean-use scenarios suggest that the chronic exposure levels associated with the most common uses

are not of concern, with regard to the targeted substances, the selected products, and the assumptions made in this HRA.

The acquired results under the reasonable worst-case scenarios suggest that the highest chronic exposure levels should be reduced, especially for acrolein (up to 3.5 μg/m^3) and benzene (up to 4 μg/m^3).

The obtained acute exposure (1 h) results suggest a need to reduce the emissions of the highest-emissivity products, especially acrolein (up to 23 μg/m^3) and formaldehyde (up to approximately 370 μg/m^3).

The emitted $PM_{2.5}$ particles could also be of concern because the acute exposure level reached 180 μg/m^3, and some of them included submicron (up to more than 3 μg/m^3) and ultrafine particles.

The obtained results provide a complementary perspective to the results of the European EPHECT project[11,21]: This HRA was focused on noncombustible air fresheners based on actual indoor air concentrations (experimental values instead of modeled concentrations) and considered a large set of substances. The same strategy, combining experiments under realistic conditions and a national use survey, could be implemented to assess the health risks of many other common consumer products.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors would like to thank the French Agency for Ecological Transition (ADEME, in the framework of the CORTEA research call through the research project PRESSENS) and the French Ministry of Environment (Ministère de la Transition Écologique) for their financial support; Nathalie VELLY (Ineris) for her technical support; Isabelle AUGEVEN-BOUR (ADEME) and Souad BOUALLALA (ADEME) for their benevolent supervision of the PRESSENS project.

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare that they have no conflicts of interest.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Guillaume Karr: Conceptualization, Formal Analysis, Methodology, Original Draft Preparation, and Writing—Review & Editing. Etienne Quivet: Methodology, Investigation, Validation, Data Curation, and Writing—Review & Editing. Martine Ramel: Conceptualization, Methodology, Validation, Writing—Review & Editing, and Project Administration. Mélanie Nicolas: Methodology, Validation, Data Curation, Writing—Review & Editing, Funding Acquisition, and Project Administration.

ORCID

Guillaume Karr https://orcid.org/0000-0002-6857-4428
Etienne Quivet https://orcid.org/0000-0002-9211-6347
Mélanie Nicolas https://orcid.org/0000-0002-5553-9869

REFERENCES

1. Jantunen M, Fernandes EO, Carrer P & Kephalopoulos S. Promoting Actions for Healthy Indoor Air (IAIAQ). European Commission Directorate General for Health and Consumers. Luxembourg. 2011. https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/4beb6973-83f8-49a9-a6c8-d31a6d75a247
2. Sarigiannis DA, Karakitsios SP, Gotti A, Liakos IL, Katsoyiannis A. Exposure to major volatile organic compounds and carbonyls in European indoor environments and associated health risk. *Environ Int*. 2011;37:743-765.
3. Boulanger G, Bayeux T, Mandin C, et al. Socio-economic costs of indoor air pollution: a tentative estimation for some pollutants of health interest in France. *Environ Int*. 2017;104:14-24.
4. Géhin E, Ramalho O, Kirchner S. Size distribution and emission rate measurement of fine and ultrafine particle from indoor human activities. *Atmos Environ*. 2008;42:8341-8352.
5. Nazaroff WW, Weschler CJ. Cleaning products and air fresheners: exposure to primary and secondary air pollutants. *Atmos Environ*. 2004;38:2841-2865.
6. Bureau européen des unions de consommateurs (BEUC). Emission of Chemicals by Air Fresheners Tests on 74 Consumer Products Sold in Europe. 2005. https://docplayer.net/49719580-Emission-of-chemicals-by-air-fresheners-tests-on-74-consumer-products-sold-in-europe-january-2005.html
7. Steinemann A. Ten questions concerning air fresheners and indoor built environments. *Build Environ*. 2017;111:279-284.
8. Scientific Committee on Health and Environmental Risks (SCHER). Opinion on the Report Emission of Chemicals by Air Fresheners. Tests on 74 Consumer Products Sold in Europe. January 2005. 2006. https://ec.europa.eu/health/archive/ph_risk/committees/04_scher/docs/scher_o_026.pdf
9. Rahman MM, Kim K-H. Potential hazard of volatile organic compounds contained in household spray products. *Atmos Environ*. 2014;85:266-274. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.12.001
10. Missia D, Kopadinis T & Bartzis J et al. Literature Review on Product Composition, Emitted Compounds and Emissions Rates and Health End Points from Consumer Products EPHECT Project, WP4 Report. 2012.
11. Trantallidi M, Dimitroulopoulou C, Wolkoff P, Kephalopoulos S, Carrer P. EPHECT III: health risk assessment of exposure to household consumer products. *Sci Total Environ*. 2015;536:903-913.
12. Johnson A & Lucica E. Survey on Indoor Use and Use Patterns of Consumer Products in EU Member States. 2012.
13. Torfs R, Brouwere K, Spruyt M, Goelen E, Nickmilder M, Bernard A. *Exposure and Risk Assessment of Air Fresheners*. Flemish Institute for Technological Research NV (VITO); 2008.
14. Norgaard AW, Kudal JD, Kofoed-Sorensen V, Koponen IK, Wolkoff P. Ozone-initiated VOC and particle emissions from a cleaning agent and an air freshener: risk assessment of acute airway effects. *Environ Int*. 2014;68:209-218.
15. Lassen C, Havelund S, Mikkelsen S, Bondgaard I, Silberschmidt M. *Survey and Health Assessment of Chemical Substances in Essential Oils and Fragrance Oils*. Danish Environmental Protection Agency; 2008.
16. Ribéron J, O'Kelly P. MARIA: an experimental tool at the service of indoor air quality in housing sector. In: Proceedings of the 9th International Conference on Indoor Air Quality and Climate—Indoor Air 2002. Monterey, Canada; 2002:191-195 pp.
17. International Organization for Standardization (ISO). *ISO 16000-3:2011: Indoor Air — Part 3: Determination of Formaldehyde and Other Carbonyl Compounds in Indoor Air and Test Chamber Air — Active Sampling Method*. International Organization for Standardization (ISO); 2011.
18. International Organization for Standardization (ISO). *ISO 16000-6:2011: Indoor Air — Part 6: Determination of Volatile Organic Compounds in Indoor and Test Chamber Air by Active Sampling on Tenax TA Sorbent, Thermal Desorption and Gas Chromatography Using MS or MS-FID*. International Organization for Standardization (ISO); 2011.

19. Institut Français D'opinion Publique (IFOP). Poll for the French Ministry of Environment; Uses of indoor non-combustible air fresheners; Annexe 1; In French. 2017. https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/Rapport-Ineris-20-200840-1997302-v1-MTES-BSE_DNC_complet.pdf
20. Dimitroulopoulou C, Lucica E, Johnson A, et al. EPHECT I: European household survey on domestic use of consumer products and development of worst-case scenarios for daily use. *Sci Total Environ*. 2015;536:880-889.
21. Dimitroulopoulou C, Trantallidi M, Carrer P, Efthimiou GC, Bartzis JG. EPHECT II: exposure assessment to household consumer products. *Sci Total Environ*. 2015;536:890-902.
22. te Biesebeek JD. General Fact Sheet - General Default Parameters for Estimating Consumer Exposure -Updated Version 2014. RIVM Report 090013003/2014. Netherlands: National Institute for Public Health and the Environment (RIVM); 2014.
23. Tirler W, Settimo G. Incense, sparklers and cigarettes are significant contributors to indoor benzene and particle levels. *Ann Ist Super Sanita*. 2015;51:28-33.
24. Salthammer T. The formaldehyde dilemma. *Int J Hyg Environ Health*. 2015;218:433-436.
25. Kim S, Hong SH, Bong CK, Cho MH. Characterization of air freshener emission: the potential health effects. *J Toxicol Sci*. 2015;40:535-550.
26. Spruyt M, Bormans R, Geyskens F, Poelmans D, Verbeke L, Goelen E. Influence of air fresheners on the indoor air quality. In: VITO Report 2006/MIM/R/032; 2006.
27. Delmas C, Weiler A-S, Ortega S, et al. Mesure de la concentration aérienne de COV terpéniques (dont le limonène) selon plusieurs procédures lors de pulvérisations d'un mélange d'huiles essentielles. *Rev Fr Allergol*. 2016;56:357-363.
28. Höllbacher E, Ters T, Rieder-Gradinger C, Srebotnik E. Emissions of indoor air pollutants from six user scenarios in a model room. *Atmos Environ*. 2017;150:389-394.
29. Rogers RE, Isola DA, Jeng CJ, Lefebvre A, Smith LW. Simulated inhalation levels of fragrance materials in a surrogate air freshener formulation. *Environ Sci Technol*. 2005;39:7810-7816.
30. Singer BC, Destaillats H, Hodgson AT, Nazaroff WW. Cleaning products and air fresheners: emissions and resulting concentrations of glycol ethers and terpenoids. *Indoor Air*. 2006;16:179-191.
31. ter Burg W, Bouma K, Schakel DJ, et al. Assessment of the risk of respiratory sensitization from fragrance allergens released by air fresheners. *Inhal Toxicol*. 2014;26:310-318.
32. Carrer P, Trantallidi M, Dimitroulopoulou S, et al. Report on the health risk associated with emissions from household use of selected consumer products. In: EPHECT Emissions, Exposure Patterns and Health Effects of Consumer Products in the EU. 2013:1-136 pp.
33. Joint Research Center (JRC). Data of the AIRMEX Project - European Indoor Air Monitoring and Exposure Assessment Project. 2007. https://ipchem.jrc.ec.europa.eu/RDSIdiscovery/ipchem/index.html#showmetadata/AIRMEX
34. Kirchner S, Arenes J-F, Cochet C, et al. National Survey: Indoor Air Quality in French Dwellings. Abstract in English. Indoor Air Quality Observatory (OQAI); 2007.
35. French Agency for Food, Environmental and Occupational Health & Safety (ANSES). Identification and Analysis of Different Emerging Indoor Air Purification Techniques. In French. 2017. https://www.anses.fr/fr/system/files/AIR2012SA0236Ra.pdf
36. Duque A, Ferreira A, Figueiredo J, et al. The air fresheners influence on the quality of the air—cross-sectional study. In: Arezes P, Baptista JS, Barroso M, eds. *Occupational Safety and Hygiene IV*. :CRC Press; 2016:399-404.
37. North ML, Brook JR, Lee EY, et al. The Kingston Allergy Birth Cohort: exploring parentally reported respiratory outcomes through the lens of the exposome. *Ann Allergy Asthma Immunol*. 2017;118:465-473.
38. Zota AR, Aschengrau A, Rudel RA, Brody JG. Self-reported chemicals exposure, beliefs about disease causation, and risk of breast cancer in the Cape Cod Breast Cancer and Environment Study: a case-control study. *Environ Health*. 2010;9:40.
39. Skurić Z, Žuškin E, Valić F. Effects of aerosols in common use on the ventilatory capacity of the lung. *Int Arch Arbeitsmedizin*. 1975;34:137.
40. Akdag M, Bakir S, Alabalik U, Ozkurt FE, Topcu I. Does usage of a room air freshener affect the nasal mucosa? *Am J Rhinol Allergy*. 2014;28:e202.
41. Umukoro S, Apara M, Ben-Azu B, Ajayi AM, Aderibigbe AO. Neurobehavioral effects of prolonged exposure to solid air freshener in mice. *Iran J Toxicol*. 2019;13:45.
42. Yuningtyaswari DSA. The effects of air freshener exposure at an early age on histological white rat (Rattus norvegicus) liver cells. AIP Conf Proc. 2016;1744:e020064.
43. Morawska L, Afshari A, Bae GN, et al. Indoor aerosols: from personal exposure to risk assessment. *Indoor Air*. 2013;23:462-487.
44. French Agency for Food, Environmental and Occupational Health & Safety (ANSES). ANSES Calls for Vigilance Concerning Essential-Oil Based Sprays and Diffusers. 2020. https://www.anses.fr/en/content/anses-calls-vigilance-concerning-essential-oil-based-sprays-and-diffusers
45. Steinemann A, Goodman N. Fragranced consumer products and effects on asthmatics: an international population-based study. *Air Qual Atmos Health*. 2019;12:643. https://doi.org/10.1007/s11869-019-00693-w
46. Steinemann A, Nematollahi N. Migraine headaches and fragranced consumer products: an international population-based study. *Air Qual Atmos Health*. 2020;13:387-390. https://doi.org/10.1007/s11869-020-00807-9
47. Geiss O, Giannopoulos G, Tirendi S, Barrero-Moreno J, Larsen BR, Kotzias D. The AIRMEX study-VOC measurements in public buildings and schools/kindergartens in eleven European cities: statistical analysis of the data. *Atmos Environ*. 2011;45:3676-3684.
48. Uhde E, Schulz N. Impact of room fragrance products on indoor air quality. *Atmos Environ*. 2015;106:492-502.
49. Singer BC, Coleman BK, Destaillats H, et al. Indoor secondary pollutants from cleaning product and air freshener use in the presence of ozone. *Atmos Environ*. 2006;40:6696-6710.
50. Afshari A, Matson U, Ekberg LE. Characterization of indoor sources of fine and ultrafine particles: a study conducted in a full-scale chamber. *Indoor Air*. 2005;15:141-150.
51. Klaassen CD. *Casarett & Doull's Toxicology: The Basic Science of Poisons*. McGraw-Hill Education; 2018.
52. Schraufnagel DE. The health effects of ultrafine particles. *Exp Mol Med*. 2020;52:311-317.

SUPPORTING INFORMATION

Additional supporting information may be found online in the Supporting Information section.

How to cite this article: Karr G, Quivet E, Ramel M, Nicolas M. Sprays and diffusers as indoor air fresheners: Exposure and health risk assessment based on measurements under realistic indoor conditions. *Indoor Air*. 2021;00:1–11. https://doi.org/10.1111/ina.12923

L’article suivant est présenté et analysé à la section 2.C.

Karr G, Ramel M. Qualité de l’air intérieur et santé : quels sont les produits de consommation présentant les risques individuels les plus élevés ? Environnement, Risques & Santé 2021 ; 20(5) : 446-456. DOI : https://doi.org/10.1684/ers.2021.1588.

Qualité de l'air intérieur et santé : quels sont les produits de consommation présentant les risques individuels les plus élevés ?

Guillaume Karr
Martine Ramel

Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris)
Parc Technologique Alata - BP2
60 550 Verneuil en Halatte
France
<guillaume.karr@ineris.fr>
<martine.ramel@ineris.fr>

Tirés à part :
G. Karr

Article reçu le 10 décembre 2020, accepté le 23 mars 2021

Résumé. La qualité de l'air intérieur représente un enjeu de santé publique majeur. Les actions des pouvoirs publics portent notamment sur la réduction des sources de polluants volatils spécifiques aux environnements intérieurs, dont certains usages domestiques de produits de consommation. Pour contribuer à identifier les produits associés aux risques sanitaires les plus préoccupants, la démarche d'évaluation des risques sanitaires (ERS) a été appliquée à trois types de produits de consommation courante, présélectionnés en fonction de leurs risques individuels attendus : désodorisants combustibles (encens, bougies parfumées), produits ménagers et désodorisants non combustibles (sprays, diffuseurs).
Le champ des ERS réalisées incluait les expositions par inhalation, chroniques et aiguës (expositions d'une heure), et les usages de type domestique. Ces ERS se sont basées sur des concentrations mesurées en conditions réelles et sur des scénarios d'exposition déterministes (« moyen » et « pire cas raisonnable ») élaborés à partir de sondages nationaux sur les usages des produits étudiés. Dans le cas particulier des produits ménagers, l'élaboration de séances de ménage complètes, « multiproduits » et « multipièces », s'est appuyée sur une consultation de parties prenantes.
Les résultats obtenus suggèrent que, dans le cadre des produits testés et des hypothèses retenues dans ces ERS, (i) les usages les plus courants correspondent à des risques individuels chroniques non préoccupants, quel que soit le type de produit étudié, considéré individuellement ; (ii) les expositions les plus élevées ont besoin d'être réduites pour assurer l'absence de risque préoccupant, notamment en réduisant les émissions des produits les plus émissifs, quel que soit le type de produit étudié ; (iii) les encens et, dans une moindre mesure, les sprays désodorisants sont les produits présentant les risques individuels les plus élevés, parmi les produits étudiés.
Les substances d'intérêt prioritaire identifiées sont l'acroléine, le benzène, le formaldéhyde et les particules fines ($PM_{2,5}$). Les effets sanitaires potentiels incluent divers troubles du système respiratoire et un excès de risque de leucémie.

Mots clés : évaluation de risques sanitaires ; produits de consommation ; encens ; produits ménagers ; sprays.

Abstract

Indoor air quality and health: the consumer products presenting the greatest individual risks

Indoor air quality is a major public health issue. Potential government actions include reducing indoor sources of volatile pollutants, especially household uses of some consumer products of concern. To help identify the products with the greatest health risks, a Health Risk Assessment (HRA) approach was applied to three types of consumer products, selected in advance for their expected individual risks: combustible air

Pour citer cet article : Karr G, Ramel M. Qualité de l'air intérieur et santé : quels sont les produits de consommation présentant les risques individuels les plus élevés ? *Environ Risque Sante* 2021 ; 20 : 446-456. doi : 10.1684/ers.2021.1588

Copyright © 2021 John Libbey Eurotext. Téléchargé par PRENOM VAUDELIN le 19/10/2021.

doi: 10.1684/ers.2021.1588

fresheners (incense, scented candles), cleaning products, and non-combustible air fresheners (sprays, diffusers).
The scope of the HRA covered inhalation exposures (chronic and acute) and household uses. These HRAs were based on concentrations measured in real conditions and on exposure scenarios ("mean" and "reasonable worst-case") developed with national utilization surveys in France. A meeting with stakeholders for cleaning products led to the development of full "multi-product" and "multi-room" cleaning sessions.
The results suggest that, based on the products tested and on the assumptions selected in these HRA, (i) the most common uses for each type of product studied correspond to individual chronic risks that may not be of concern, (ii) the highest exposures for each type of product should be reduced to ensure safe use and, as such, emissions should be reduced for the products with the highest emission levels, (iii) incense products and, to a lesser extent, fragrance sprays are the consumer products with the highest individual risks among the products studied. The priority substances identified were acrolein, benzene, formaldehyde, and fine particulate matter ($PM_{2.5}$). Potential health effects include various respiratory system disorders and an excess risk of leukemia.

Key words: *health risk assessment (HRA); consumer products; incense; cleaning products; sprays.*

Copyright © 2021 John Libbey Eurotext. Téléchargé par PRENOM VAUDELIN le 19/10/2021.

La population générale passe 70 à 90 % de son temps dans des espaces clos (habitations, bureaux, écoles, moyens de transport, établissements recevant du public, etc.). Par conséquent, la qualité de l'air intérieur représente un enjeu de santé publique majeur [1-4]. En France, les lois dites Grenelle 1 et 2, les Plans nationaux santé environnement (PNSE) et le Plan d'actions sur la qualité de l'air intérieur (PQAI) ont placé cette thématique au cœur des actions des pouvoirs publics. Ces actions portent notamment sur la réduction des sources de polluants spécifiques aux environnements intérieurs, dont certains produits de consommation courante. Par conséquent, pouvoir répondre à la question « Quels sont les produits de consommation présentant les risques sanitaires les plus préoccupants ? » permettrait de prioriser et d'augmenter l'efficacité des actions des pouvoirs publics.

Les études présentées dans cet article ont visé à apporter des éléments de réponse à cette question, en étudiant les risques individuels par inhalation associés aux usages domestiques de différents produits de consommation. Ces études ont été menées entre 2009 et 2020, par l'Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris), dans le cadre de ses missions d'appui au ministère chargé de l'Environnement.

Matériels et méthodes

Hiérarchisation des besoins d'études selon les risques individuels attendus

Une revue de la littérature scientifique et technique a été réalisée en 2009, visant à collecter les données disponibles sur les émissions de substances préoccupantes dans l'air intérieur, issues de produits de consommation [5]. Cette revue a notamment porté sur les composés organiques volatils (COV) et les particules émises par plusieurs catégories génériques de produits de consommation, jugées préoccupantes par le ministère chargé de l'Environnement et par des associations de consommateurs, dont les produits d'entretien et les désodorisants d'intérieur.

Les composés organiques semi-volatiles (COSV), mieux documentés aujourd'hui qu'en 2009, font l'objet d'études en cours de réalisation, s'inscrivant dans la suite des travaux présentés dans le présent article.

À partir des données d'émissions collectées, des modèles d'exposition simples (*Targeted Risk Assessment* [TRA] et *Consumer Exposure* [ConsExpo]) ont été utilisés pour calculer des indicateurs de risque sanitaire, basés sur les classiques quotient de danger (QD) et excès de risques individuels (ERI) [6, 7]. Dans un premier niveau d'approche, les indicateurs obtenus ont permis d'identifier des substances d'intérêt prioritaire, pour chaque produit de consommation considéré, et d'évaluer les niveaux de risques individuels attendus [6, 7]. Ces premiers résultats ont permis de hiérarchiser les besoins d'études plus détaillées, en donnant la priorité aux produits de consommation pour lesquels de plus forts risques individuels étaient attendus, et en visant notamment à approfondir l'évaluation des risques sanitaires (ERS) liés aux substances d'intérêt prioritaire identifiées.

Élaboration de scénarios d'exposition génériques sur la base de sondages nationaux sur les usages

Pour les produits de consommation associés aux plus forts risques attendus, des évaluations des risques sanitaires liés aux expositions par inhalation ont été réalisées. Compte

Copyright © 2021 John Libbey Eurotext. Téléchargé par PRENOM VAUDELIN le 19/10/2021.

tenu du faible niveau d'informations disponibles sur les usages des produits de consommation dans la littérature scientifique et technique, d'une manière générale et en particulier pour le contexte français, des sondages nationaux ont été réalisés en s'appuyant sur des sociétés spécialisées. Ces sondages ont porté sur des échantillons de 1 000 à 1 500 personnes, représentatifs de la population française âgée de 18 ans et plus. Cette représentativité a été assurée par la méthode des quotas (sexe, âge, profession du chef de famille), après stratification par région et par catégorie d'agglomération. Les réponses ont été collectées par des entretiens téléphoniques ou par des questionnaires auto-administrés en ligne [8, 9].

Le détail de ces réponses a permis d'élaborer deux types de scénarios d'exposition déterministes pour appuyer la réalisation des ERS : un scénario « moyen » et un scénario « pire cas raisonnable ». Le scénario « moyen » a visé à caractériser un utilisateur dont les pratiques et les caractéristiques environnementales (volume de la pièce d'utilisation, taux de renouvellement d'air, etc.) sont courantes, se trouvant dans la moyenne des pratiques et des caractéristiques observées ; typiquement, les composantes de ce scénario ont été choisies parmi les médianes des résultats des sondages. Le scénario « pire cas raisonnable » a visé à caractériser un utilisateur dont les pratiques et les caractéristiques environnementales majorent raisonnablement l'exposition moyenne ; typiquement, les composantes de ce scénario ont été choisies parmi les percentiles 90 des résultats des sondages ; en particulier, ce scénario a inclus une absence d'aération manuelle vers l'extérieur.

Ces deux types de scénarios, déclinés spécifiquement pour chaque type de produits de consommation étudié, fournissent deux niveaux d'exposition significativement différents et donnent ainsi une première caractérisation de la variété des expositions existantes.

Caractéristiques des produits testés

Dans l'objectif de s'approcher de conditions réelles d'utilisation, les études réalisées se sont basées sur des produits choisis parmi ceux directement disponibles à la vente, dans des lieux de commercialisation variés : grandes surfaces, magasins spécialisés, sites Internet.

Au total, 82 produits ont été testés : 29 encens, 9 bougies parfumées, 23 produits ménagers manufacturés, 6 produits ménagers « faits maison » et 15 désodorisants (4 sprays et 11 diffuseurs).

Ces produits ont été choisis en tenant compte de la diversité des formats disponibles auprès des consommateurs. Par exemple, les encens testés pouvaient être au format cône ou bâton (plus ou moins épais, avec ou sans tige) ; les produits ménagers testés ont inclus des liquides, des crèmes, des lingettes et des sprays ; les désodorisants non combustibles pouvaient se présenter sous la forme de gels, de liquides ou de sprays.

Mesures en conditions réelles

Pour chaque produit étudié, l'ERS s'est basée sur des concentrations mesurées dans des conditions réalistes, au sein d'une maison expérimentale. En effet, un partenariat avec le Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB), notamment dans le cadre de projets de recherche subventionnés par l'Agence de la transition écologique (Ademe), a permis de s'appuyer sur des campagnes de mesures réalisées dans la Maison automatisée pour des recherches innovantes sur l'air (MARIA [10], Champs-sur-Marne), qui ont notamment ciblé les substances d'intérêt associées aux plus forts risques attendus.

Les concentrations mesurées ont porté sur les premières heures suivant le début de l'utilisation de chaque produit testé, utilisé selon les recommandations du fabricant et dans des pièces présentant des taux de renouvellement d'air réalistes. Ces concentrations étaient des moyennes sur des pas de temps de 15, 30 ou 60 minutes, selon le type de produit considéré.

Du point de vue analytique, pour les substances d'intérêt identifiées pour chaque type de produit et sur la base de premiers résultats d'essais, des mesures spécifiques ont été réalisées pour appuyer les évaluations d'expositions et de risques.

Évaluations des risques sanitaires

Sur la base des différentes composantes des scénarios d'exposition élaborés, les concentrations mesurées dans MARIA ont été extrapolées à des concentrations moyennes journalières, puis à des concentrations moyennes inhalées (CMI) [11-13], afin de caractériser les expositions chroniques par inhalation. En particulier, les fréquences et les temps d'utilisation des scénarios retenus ont été pris en compte par des facteurs multiplicatifs ; pour le type de scénario « pire cas raisonnable », les concentrations ont été considérées, après utilisation d'un produit, comme décroissant sous l'effet du taux de renouvellement d'air de la pièce considérée.

Les expositions aiguës (risques aigus) ont également été étudiées. Compte tenu des usages observés pour les produits de consommation considérés (encens, produits ménagers, diffuseurs, etc.), une période d'exposition d'une heure a été retenue. Les expositions aiguës ont donc été caractérisées par des concentrations horaires maximales.

Pour chaque substance émise par chaque produit étudié, une collecte et un choix de valeurs toxicologiques de référence (VTR) ont été réalisés, en cohérence avec la logique des standards français [14]. Les choix réalisés ont pu varier en fonction des études réalisées, car les VTR disponibles et les expertises toxicologiques nationales ont pu évoluer au cours de la période 2009-2020, comme pour le formaldéhyde par exemple.

Copyright © 2021 John Libbey Eurotext. Téléchargé par PRENOM VAUDELIN le 19/10/2021.

Au regard du manque de VTR disponibles pour caractériser la toxicité des substances émises par les produits testés, d'autres valeurs de toxicité ont été considérées à titre indicatif, car leur méthode d'élaboration est proche de celle des VTR : les concentrations limites d'intérêt (CLI), françaises et européennes [15], et les valeurs guides de qualité d'air intérieur (VGAI), françaises et allemandes [16].

Sur la base des expositions évaluées et des valeurs de toxicité retenues, la démarche ERS a été appliquée [17] ; les risques ont été quantifiés par des quotients de danger (QD) pour les effets à seuil, par des excès de risque individuels (ERI) pour les effets sans seuil, et par un ratio de risque aigu (RRA, rapport entre l'exposition aiguë et la VTR aiguë ; défini ainsi par souhait d'uniformité avec la logique du QD pour les expositions chroniques).

Résultats

Hiérarchisation des besoins d'études

La revue bibliographique réalisée [5] a permis de collecter différents types de données : compositions (fraction massique - %), taux d'émission (mg/g), flux d'émissions (mg/h), concentrations d'émissions (µg/m^3 dans la pièce de mesures, à différents pas de temps). À partir de ces données collectées, des expositions et des indicateurs de risques individuels ont pu être calculés [6, 7]. Sur la base de ces indicateurs, les produits et les substances émises associés aux plus forts risques individuels attendus ont été identifiés :

– les encens (particules, benzène, acroléine) ;
– les produits ménagers (formaldéhyde, benzène, terpènes), notamment sous forme de sprays ;
– les diffuseurs de parfum utilisant une source d'énergie (« diffuseurs actifs » - formaldéhyde).

Par conséquent, des ERS détaillées ont été planifiées, successivement :

– pour les désodorisants combustibles (encens et bougies parfumées) ;
– pour les produits ménagers ;
– et pour les désodorisants non combustibles (diffuseurs actifs et passifs ; sprays).

Ces ERS détaillées ont notamment inclus les substances préoccupantes identifiées à cette étape.

Élaboration de scénarios d'exposition génériques

Un scénario « moyen » et un scénario « pire cas raisonnable » ont été élaborés pour les trois types de produits de consommation sélectionnés (*tableaux 1, 2* et *3*). Les scénarios associés aux utilisateurs de désodorisants, combustibles et non combustibles, ont pu être élaborés à partir des résultats détaillés des sondages effectués. Concernant les produits ménagers, les résultats du sondage spécifique montraient des incohérences significatives, notamment des sur-déclarations manifestes. Par conséquent, des séances de ménage complètes ont été élaborées en s'appuyant sur les données disponibles dans la littérature scientifique et technique, et une concertation de parties prenantes de profils variés : fabricants, société de prestations de ménage à domicile, particuliers, associations de famille, associations santé-environnement, etc. [12].

Évaluation des expositions

Sur la base des scénarios d'exposition élaborés et des concentrations mesurées en conditions réelles, des expositions chroniques et aiguës ont été calculées pour chaque

Tableau 1. Scénarios d'exposition génériques élaborés pour les utilisateurs de désodorisants combustibles (encens et bougies parfumées).

Table 1. Generic exposure scenarios developed for users of combustible air fresheners (incense and scented candles).

	Utilisateurs d'encens		Utilisateurs de bougies	
Composantes des scénarios	Moyen	Pire cas raisonnable	Moyen	Pire cas raisonnable
Fréquence d'utilisation (/jour)	0,07*	0,5	0,1	1
Durée de combustion (min)	20	60	50	120
Durée d'exposition (années)	70	70	70	70
Nombre de produits utilisés simultanément (nb)	1	2	1,5	3
Pièce(s) où les produits sont utilisés	Salon / salle à manger	Salon / salle à manger	Salon / salle à manger	Salon / salle à manger
Aération manuelle	Ouverture 10′ sur l'extérieur après utilisation	Pas d'aération	Ouverture 10′ sur l'extérieur après utilisation	Pas d'aération

* Environ deux fois par mois.

Tableau 2. Séances de ménage génériques élaborées pour les utilisateurs de produits ménagers.

Table 2. Generic cleaning sessions developed for users of cleaning products.

Séance du scénario « moyen »	Séance du scénario « pire cas raisonnable »
1 fois par jour (temps d'utilisation moyen) **Cuisine** • produit vaisselle : 10 min • nettoyant multi-usages : 10 min *1 fois par semaine (temps d'utilisation moyen)* **Cuisine** • nettoyant multi-usages : 15 min • nettoyant sol : 10 min • nettoyant vitres (1 fois / 3 semaines) : 10 min **Chambres (2)** • nettoyant sol : 5 min • nettoyant vitres (1 fois / 3 semaines) : 5 min **Salle de bain (SdB)** • nettoyant SdB : 10 min • javel à diluer : 5 min • nettoyant sol : 5 min • nettoyant vitres (1 fois / 3 semaines) : 5 min **Toilettes** • nettoyant sol : 5 min • nettoyant WC : 5 min **Salon / salle à manger** • nettoyant sol : 15 min • nettoyant vitres (1 fois / 3 semaines) : 10 min	*1 fois par jour (temps d'utilisation moyen)* **Cuisine** • produit vaisselle : 30 min • nettoyant multi-usages : 20 min • nettoyant sol : 5 min **Toilettes** • nettoyant WC : 5 min **Salle de bain (SdB)** • nettoyant SdB : 10 min *En complément, 2 fois par semaine (temps d'utilisation moyen)* **Cuisine** • nettoyant multi-usages : 20 min • nettoyant sol : 10 min • nettoyant vitres : 10 min **Chambres (4) – temps par chambre :** • dépoussiérant meubles : 10 min • nettoyant sol : 10 min • nettoyant vitres : 5 min **Salle de bain** nettoyant SdB : 15 min javel à diluer : 10 min • nettoyant sol : 10 min • nettoyant vitres : 5 min **Toilettes** • nettoyant WC : 10 min • javel à diluer : 5 min **Salon / salle à manger** • nettoyant sol : 20 min • dépoussiérant meubles : 15 min • nettoyant vitres : 10 min **Cellier/débarras :** • nettoyant multi-usages : 5 min

substance émise par chaque produit testé [11, 12, 18-20]. Les *tableaux 4* à *7* présentent une synthèse des résultats obtenus pour quatre substances d'intérêt au regard de la hiérarchisation réalisée et de la littérature scientifique – formaldéhyde, benzène, acroléine et limonène – dans le cadre des scénarios « pire cas raisonnable » élaborés.

Évaluations des risques

Un QD, un ERI et un RRA ont été calculés pour chaque substance émise par chaque produit testé [11, 12, 18-20], lorsque les VTR disponibles le permettaient.

Pour les risques chroniques associés aux scénarios « moyens » considérés, pour chaque substance considérée individuellement, aucune quantification de risque (QD, ERI, CMI/CLI - CMI/VGAI) ne dépasse les valeurs repères de QD de « 1 » et d'ERI de « 10^{-5} », usuellement retenues pour distinguer les risques jugés préoccupants.

Dans l'objectif de tenir compte des potentiels effets liés aux mélanges de substances, en première approche et à titre indicatif, la somme des QD et la somme des ERI ont été calculées pour chaque produit : elles sont également inférieures aux valeurs repères usuelles. Enfin, une somme « multiproduits » de QD et d'ERI a été réalisée pour la séance de ménage élaborée pour le scénario « moyen » d'utilisation de produits ménagers : les sommes obtenues sont également inférieures aux valeurs repères usuelles.

Pour les risques chroniques associés aux scénarios « pire cas raisonnable » élaborés, certains dépassements de valeurs repères usuelles ont été obtenus, dont les principaux sont présentés ci-dessous.

Concernant les effets chroniques sans seuil du benzène, en retenant une VTR de $2{,}6.10^{-5}$ $(\mu g/m^3)^{-1}$ (Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail [Anses], 2013 ; effets critiques : leucémies aiguës), des dépassements ont été

Copyright © 2021 John Libbey Eurotext. Téléchargé par PRENOM VAUDELIN le 19/10/2021.

Copyright © 2021 John Libbey Eurotext. Téléchargé par PRENOM VAUDELIN le 19/10/2021.

Tableau 3. Scénarios d'exposition génériques élaborés pour les utilisateurs de désodorisants non combustibles (sprays et diffuseurs).

Table 3. Generic exposure scenarios developed for users of non-combustible air fresheners (sprays and diffusers).

Paramètres d'exposition		Utilisateurs de sprays aérosols		Utilisateurs de diffuseurs passifs		Utilisateurs de diffuseurs actifs	
		Moyen	Pire cas raisonnable	Moyen	Pire cas raisonnable	Moyen	Pire cas raisonnable
Fréquence d'utilisation (/jour)	Toilettes	1,5	6	Continu	Continu	-	Continu
	Salon et/ou salle à manger	0,1	2,5	-		0,43	
	Cuisine	0,1	2,5	-		-	
	Hall d'entrée	0,03	1,5	-		-	
	Salle de bain	0,03	1,5	-		-	
	Chambre(s)	0,01	1	-		-	
	Pièce(s) annexe(s)	0,01	0,43	-		-	
Durée d'utilisation		Nombre de pressions		Nombre de mois par an (utilisation continue)		Durée d'une utilisation (min)	Nombre de mois par an (utilisation continue)
		2	4				
		Durée d'une pression		10	11	40	11
		1	2				
Présence dans la pièce pendant et après l'utilisation		Départ après utilisation, puis retour possible au bout de 30′	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Durée d'exposition (années)		70	70	70	70	70	70
Aération manuelle (ouverture sur l'extérieur)		3 fois sur 4 : 10′ sur l'extérieur, 20′ après utilisation 1 fois sur 4 : pas d'aération	Pas d'aération	Pendant 10′ tous les jours	Pas d'aération	Pendant 10′, 30′ après utilisation	Pas d'aération

Tableau 4. Expositions au formaldéhyde (µg/m^3) évaluées pour les produits de consommation étudiés (scénarios « pire cas raisonnable »).

Table 4. Exposures to formaldehyde (µg/m^3), assessed for the consumer products studied (reasonable worst-case scenarios).

Types et nombres de produits pour chaque étude réalisée	Formaldéhyde							
	Expositions chroniques				Expositions aiguës			
	Min.	Max.	Med.	Moy.	Min.	Max.	Med.	Moy.
20 encens	$2{,}5.10^{-1}$	2,3	$5{,}8.10^{-1}$	$7{,}6.10^{-1}$	$1{,}1.10^{1}$	$7{,}0.10^{1}$	$2{,}8.10^{1}$	$3{,}3.10^{1}$
9 encens	4.10^{-1}	1	$8{,}2.10^{-1}$	$7{,}8.10^{-1}$	$1{,}2.10^{1}$	$9{,}6.10^{1}$	$5{,}7.10^{1}$	$5{,}6.10^{1}$
9 bougies parfumées	$5{,}1.10^{-1}$	5,1	1,6	2,0	3,1	$5{,}6.10^{1}$	$2{,}2.10^{1}$	$2{,}3.10^{1}$
19 produits ménagers manufacturés	0,0	$1{,}2.10^{1}$	$6{,}1.10^{-1}$	1,3	0,0	$1{,}4.10^{2}$	$2{,}5.10^{1}$	$4{,}1.10^{1}$
4 produits ménagers manufacturés	0	$1{,}2.10^{1}$	$2{,}3.10^{-1}$	2,6	0,0	$6{,}0.10^{1}$	3,8	$1{,}6.10^{1}$
6 produits ménagers faits maison	0	3,8	1,4	1,7	0,0	$7{,}9.10^{1}$	$1{,}9.10^{1}$	$2{,}8.10^{1}$
4 sprays aérosols	$3{,}1.10^{-1}$	$5{,}2.10^{1}$	$3{,}7.10^{1}$	$3{,}0.10^{1}$	$9{,}2.10^{-1}$	$2{,}3.10^{2}$	$1{,}1.10^{2}$	$1{,}1.10^{2}$
6 diffuseurs passifs	$8{,}6.10^{-3}$	$5{,}7.10^{1}$	2,2	$1{,}3.10^{1}$	$5{,}6.10^{-2}$	$3{,}7.10^{2}$	$1{,}5.10^{1}$	$8{,}4.10^{1}$
5 diffuseurs actifs	0,0	$4{,}5.10^{1}$	5,3	$1{,}0.10^{1}$	0,0	$2{,}9.10^{2}$	$3{,}2.10^{1}$	$6{,}1.10^{1}$
Campagne nationale logement (OQAI)	Médiane : 19,6 - Percentile 95 : 46,7							
Concentrations de fond dans les logements européens (retenues pour le projet EPHECT)	Minimum : 4 - Maximum 57 - Moyenne : 22							

Expositions chroniques : concentrations moyennes inhalées (CI, µg/m^3) ; Expositions aiguës : concentrations horaires maximales (µg/m^3) ; Min. : valeur minimale ; Max. : valeur maximale ; Med. : valeur médiane ; Moy. : valeur moyenne.

Tableau 5. Expositions au benzène (µg/m^3) évaluées pour les produits de consommation étudiés (scénarios « pire cas raisonnable »).

Table 5. Exposures to benzene (µg/m^3), assessed for the consumer products studied (reasonable worst-case scenarios).

Types et nombres de produits pour chaque étude réalisée	Benzène							
	Expositions chroniques				Expositions aiguës			
	Min.	Max.	Med.	Moy.	Min.	Max.	Med.	Moy.
20 encens	$7{,}8.10^{-2}$	4	$6{,}9.10^{-1}$	1,4	2,5	$2{,}2.10^{2}$	$2{,}5.10^{1}$	$6{,}1.10^{1}$
9 encens	$3{,}6.10^{-1}$	$1{,}1.10^{1}$	$8{,}4.10^{-1}$	2,6	9,7	$4{,}0.10^{2}$	$5{,}7.10^{1}$	$1{,}2.10^{2}$
9 bougies parfumées	0,0	$2{,}9.10^{-1}$	$9{,}2.10^{-2}$	$9{,}5.10^{-2}$	0	8,4	$2{,}9.10^{-1}$	$9{,}3.10^{-1}$
19 produits ménagers manufacturés	0,0	$1{,}9.10^{-1}$	$5{,}8.10^{-3}$	$2{,}7.10^{-2}$	0,0	$2{,}1.10^{1}$	$5{,}5.10^{-1}$	3,0
4 produits ménagers manufacturés	< LQ				< LQ			
6 produits ménagers faits maison	< LQ				< LQ			
4 sprays aérosols	0,0	2,8	$9{,}0.10^{-1}$	1,2	0,0	7,2	2,3	3,0
6 diffuseurs passifs	0,0	$9{,}7.10^{-1}$	0,0	$1{,}4.10^{-1}$	0,0	6,3	0,0	$9{,}3.10^{-1}$
5 diffuseurs actifs	0,0	4,0	$6{,}6.10^{-2}$	$6{,}1.10^{-1}$	0,0	$2{,}1.10^{1}$	$9{,}7.10^{-1}$	4,2
Campagne nationale logement (OQAI)	Médiane : 2,1 - Percentile 95 : 7,2							
Concentrations de fond dans les logements européens (retenues pour le projet EPHECT)	Minimum : 0 - Maximum 24 - Moyenne : 3							

Expositions chroniques : concentrations moyennes inhalées (CI, µg/m^3) ; Expositions aiguës : concentrations horaires maximales (µg/m^3) ; Min. : valeur minimale ; Max. : valeur maximale ; Med. : valeur médiane ; Moy. : valeur moyenne.

obtenus pour 21 encens (sur 29 testés, avec un ERI maximal de $2{,}7.10^{-4}$), deux sprays désodorisants (sur quatre testés ; $ERI_{max} = 7{,}2.10^{-5}$), un diffuseur passif (sur six testés ; ERI = $2{,}5.10^{-5}$) et un diffuseur actif (sur quatre testés ; ERI = $7{,}3.10^{-5}$).

Concernant les effets chroniques à seuil de l'acroléine, en retenant une VTR de 0,15 µg/m^3 (Anses, 2019 ; effets critiques : lésions de l'épithélium respiratoire supérieur), des dépassements ont été obtenus pour une bougie parfumée (sur neuf testées ; QD = 4,2), quatre

Tableau 6. Expositions à l'acroléine (µg/m^3) évaluées pour les produits de consommation étudiés (scénarios « pire cas raisonnable »)

Table 6. Exposures to acrolein (µg/m^3), assessed for the consumer products studied (reasonable worst-case scenarios).

Types et nombres de produits pour chaque étude réalisée	Acroléine							
	Expositions chroniques				Expositions aiguës			
	Min.	Max.	Med.	Moy.	Min.	Max.	Med.	Moy.
20 encens	< LQ				< LQ			
9 encens*	$1{,}6.10^{-3}$	$4{,}3.10^{-2}$	$9{,}4.10^{-3}$	$1{,}6.10^{-2}$	$1{,}1.10^{1}$	$6{,}6.10^{1}$	$4{,}0.10^{1}$	$4{,}5.10^{1}$
9 bougies parfumées*	$5{,}0.10^{-2}$	$6{,}3.10^{-1}$	$8{,}4.10^{-2}$	$2{,}5.10^{-1}$	$3{,}2.10^{-1}$	$1{,}0.10^{1}$	1,1	2,1
19 produits ménagers manufacturés	0,0	$5{,}7.10^{-1}$	$1{,}7.10^{-2}$	$9{,}3.10^{-2}$	0,0	$1{,}2.10^{1}$	2,4	3,3
4 produits ménagers manufacturés	< LQ				< LQ			
6 produits ménagers faits maison	0	$1{,}4.10^{-1}$	0	$5{,}0.10^{-2}$	0	2,8	0	$8{,}4.10^{-1}$
4 sprays aérosols	$1{,}7.10^{-1}$	3,5	1,1	1,3	$5{,}3.10^{-1}$	$2{,}3.10^{1}$	2,8	6,7
6 diffuseurs passifs	0,0	$2{,}2.10^{-1}$	0,0	$4{,}7.10^{-2}$	0,0	1,5	0,0	$3{,}0.10^{-1}$
5 diffuseurs actifs	0,0	$5{,}4.10^{-1}$	$1{,}3.10^{-2}$	$1{,}2.10^{-1}$	0,0	3,5	$2{,}7.10^{-1}$	$9{,}1.10^{-1}$
Campagne nationale logement (OQAI)	Médiane : 1,1 - Percentile 95 : 3,4							
Concentrations de fond dans les logements européens (retenues pour le projet EPHECT)	-							

Expositions chroniques : concentrations moyennes inhalées (CI, µg/m^3) ; Expositions aiguës : concentrations horaires maximales (µg/m^3) ; Min. : valeur minimale ; Max. : valeur maximale ; Med. : valeur médiane ; Moy. : valeur moyenne ; LQ : limite de quantification. * Expositions chroniques basées sur des mesures *off-line* (cartouches DNPH connectées à un système d'extraction mécanique vers l'extérieur de la pièce de mesure) et expositions aiguës basées sur des mesures *on-line* (*Proton Transfer Reaction - Time of Flight - Mass Spectrometer* (PTR-ToF-MS)) directement réalisées dans la pièce de mesure. Les différences observées sont imparfaitement comprises à ce stade ; elles pourraient être liées à la forte réactivité de l'acroléine.

Copyright © 2021 John Libbey Eurotext. Téléchargé par PRENOM VAUDELIN le 19/10/2021.

Tableau 7. Expositions au limonène (µg/m^3) évaluées pour les produits de consommation étudiés (scénarios « pire cas raisonnable »).

Table 7. Exposures to limonene (µg/m^3), assessed for the consumer products studied (reasonable worst-case scenarios).

Types et nombres de produits pour chaque étude réalisée	Limonène							
	Expositions chroniques				Expositions aiguës			
	Min.	Max.	Med.	Moy.	Min.	Max.	Med.	Moy.
20 encens	-	-	-	-	-	-	-	-
9 encens	$1{,}2.10^{-3}$	$2{,}0.10^{-1}$	$3{,}1.10^{-2}$	$6{,}6.10^{-2}$	$8{,}0.10^{-2}$	6,1	1,3	2,2
9 bougies parfumées	0,0	$4{,}7.10^{-1}$	$1{,}3.10^{-1}$	$1{,}5.10^{-1}$	0,0	5,4	$9{,}8.10^{-1}$	1,5
19 produits ménagers manufacturés	0,0	$3{,}7.10^{1}$	$4{,}8.10^{-1}$	5,2	0,0	$7{,}2.10^{2}$	$7{,}1.10^{1}$	$1{,}5.10^{2}$
4 produits ménagers manufacturés	0,0	$1{,}8.10^{-1}$	$4{,}9.10^{-2}$	$7{,}3.10^{-2}$	0,0	4,4	1,1	1,8
6 produits ménagers faits maison	0,0	$2{,}7.10^{1}$	$4{,}6.10^{-1}$	3,8	0	$6{,}6.10^{2}$	$9{,}4.10^{1}$	$1{,}1.10^{1}$
4 sprays aérosols	3,1	$2{,}2.10^{3}$	$4{,}3.10^{2}$	$5{,}9.10^{2}$	$1{,}5.10^{1}$	$1{,}1.10^{4}$	$2{,}1.10^{3}$	$2{,}8.10^{3}$
6 diffuseurs passifs	0,0	$9{,}7.10^{1}$	1,1	$1{,}7.10^{1}$	0,0	$6{,}3.10^{2}$	7,5	$1{,}1.10^{2}$
5 diffuseurs actifs	0,0	$8{,}0.10^{3}$	$7{,}3.10^{1}$	$1{,}1.10^{3}$	0,0	$5{,}2.10^{4}$	$6{,}0.10^{2}$	$7{,}9.10^{3}$
Campagne nationale logement (OQAI)	-							
Concentrations de fond dans les logements européens (retenues pour le projet EPHECT)	Minimum : 0 - Maximum 493 - Moyenne : 29							

Expositions chroniques : concentrations moyennes inhalées (CI, µg/m^3) ; Expositions aiguës : concentrations horaires maximales (µg/m^3) ; Min. : valeur minimale ; Max. : valeur maximale ; Med. : valeur médiane ; Moy. : valeur moyenne.

sprays désodorisants (sur quatre testés ; QD_{max} = 24), deux diffuseurs passifs (sur six testés ; QD_{max} = 1,5) et un diffuseur actif (sur six testés ; QD = 3,6).

Pour les expositions aiguës, plusieurs dépassements des $VTR_{aiguës}$ sélectionnées ont été obtenus, dont les principaux sont présentés ci-dessous.

Concernant le formaldéhyde, en retenant la VGAI française de 100 µg/m^3 (Anses, 2018 ; effets critiques : irritation oculaire, potentiel précurseur d'effets cancérogènes), des dépassements ont été obtenus pour cinq produits ménagers manufacturés (sur 23 testés ; RRA_{max} = 1,4), deux sprays désodorisants (sur quatre testés ; RRA_{max} = 2,3), deux diffuseurs passifs (sur six testés ; RRA_{max} = 3,7) et un diffuseur actif (sur cinq testés ; RRA_{max} = 2,9).

Concernant le benzène, en retenant une VTR de 27 µg/m^3 (*Office of Environmental Health Hazard Assessment* [OEHHA], 2014 ; effets critiques : troubles de la reproduction, anémie aplasique et leucémie aiguë), des dépassements ont été obtenus pour 17 encens (sur 29 testés ; RRA_{max} = 14,9).

Concernant l'acroléine, en retenant la VGAI française de 6,9 µg/m^3 (Anses, 2013 ; effets critiques : irritation nasale et de la gorge, diminution de la fréquence respiratoire), des dépassements ont été obtenus pour neuf encens (sur 29 testés ; RRA_{max} = 8,7), une bougie parfumée (sur neuf testées ; RRA = 1,5), cinq produits ménagers manufacturés (sur 23 testés ; RRA_{max} = 1,7) et un spray désodorisant (sur quatre testés ; RRA_{max} = 3,3).

Aucune VTR n'était disponible pour caractériser la toxicité du limonène. En considérant la CLI européenne de 5 000 µg/m^3, quelques dépassements ponctuels (deux diffuseurs actifs) et de faibles ampleurs (max : + 60 %) ont été obtenus. À titre indicatif, aucune exposition calculée n'a dépassé les valeurs de toxicité chronique et aiguë (9 et 90 mg/m^3) élaborées dans le cadre du projet européen de référence EPHECT [21].

Enfin, concernant les particules fines ($PM_{2,5}$), les tests effectués sur plusieurs produits ont conduit à des concentrations horaires supérieures à 100 µg/m^3 (encens, sprays désodorisants). À ce stade, d'une manière générale, les particules de l'air intérieur ne font pas l'objet d'une valeur repère de toxicité [22] : les risques associés ne peuvent donc pas être classiquement quantifiés dans une ERS. Néanmoins, les particules émises par les produits testés sont de compositions peu documentées et incluent des particules ultrafines [11, 12, 20] : elles font donc l'objet de préoccupations, notamment celles issues d'un processus de combustion incomplet comme celui des encens (benzène, hydrocarbures, carbone suie).

Discussion

Les résultats obtenus pour les scénarios « moyens » suggèrent que les expositions chroniques les plus courantes peuvent être considérées comme non préoccupantes, au regard des substances considérées, des produits testés et des hypothèses retenues pour les études.

Néanmoins, des quantifications de risque n'ont été réalisées que pour les substances émises dont la toxicité a

Copyright © 2021 John Libbey Eurotext. Téléchargé par PRENOM VAUDELIN le 19/10/2021.

Copyright © 2021 John Libbey Eurotext. Téléchargé par PRENOM VAUDELIN le 19/10/2021.

pu être caractérisée par une valeur de référence – soit moins de la moitié des substances pour les produits ménagers et pour les désodorisants non combustibles. De plus, les types de produits considérés peuvent émettre des substances dont les effets sont aujourd'hui imparfaitement compris et quantifiables par des VTR : substances à l'état nanoparticulaire, sensibilisants respiratoires et perturbateurs endocriniens [11, 12, 19, 20]. En outre, les produits étudiés peuvent émettre plusieurs dizaines de substances, simultanément, alors que la toxicité des mélanges de substances est imparfaitement quantifiable avec les VTR disponibles : des synergies de toxicité ne peuvent être exclues. Enfin, puisque les substances présentant les risques les plus élevés (acroléine, benzène, formaldéhyde, particules fines) ne sont pas spécifiques aux émissions des produits testés, des cumuls d'exposition sont attendus avec d'autres produits que ceux étudiés, et avec d'autres types de sources (meubles, produits de construction, peintures, aliments cuits à fortes températures, fumée de tabac, etc.). Ces expositions cumulées pourraient conduire à des risques plus élevés que ceux identifiés pour chaque source, considérée individuellement, comme le suggère déjà la mise en regard des expositions présentées aux *tableaux 4* à *7*. Par conséquent, dans une logique de prudence, des actions de réduction des expositions les plus courantes pourraient être considérées, en particulier pour les personnes les plus sensibles : jeunes enfants, femmes enceintes, personnes asthmatiques, etc.

Les résultats obtenus pour les scénarios « pire cas raisonnable » suggèrent un besoin de diminuer les expositions chroniques les plus fortes, notamment pour les substances d'intérêt prioritaire suivantes : acroléine, benzène, formaldéhyde et particules. Les résultats obtenus pour les expositions aiguës suggèrent que cette diminution des expositions les plus fortes devra inclure la diminution des émissions issues des produits les plus émissifs.

Ces résultats suggèrent également des priorités d'actions pour les produits de consommation considérés, au regard du nombre de dépassements de valeurs repères usuelles obtenus, de leur ampleur et de la gravité des effets critiques associés. Ainsi, les encens peuvent être considérés comme les produits de consommation associés aux risques les plus élevés ; viennent ensuite les sprays désodorisants, avec un second niveau de priorité.

De manière générale, concernant les produits de consommation, la littérature scientifique présente peu d'évaluations de risques sanitaires [11–13, 21, 23]. La plupart de ces études se base sur des données d'usage générique, à l'exception notable de l'ERS du projet européen EPHECT [21] qui se base sur des usages identifiés par sondage, et sur des mesures réalisées en laboratoire, dans des chambres d'essais d'émission, à l'exception notable de l'étude réalisée par le Bureau européen des unions de consommateurs (BEUC) en 2005 [23]. À notre connaissance, les ERS présentées dans le présent article sont les premières à se baser sur des mesures en conditions réelles et sur des scénarios d'exposition élaborés à l'aide de sondages nationaux (fournissant des données d'usage représentatives et spécifiques). De plus, pour le cas particulier des produits ménagers, à notre connaissance, l'ERS réalisée est la première à considérer une séance de ménage complète, à la fois « multiproduits » et « multipièces ».

Les substances émises peuvent former des composés secondaires, notamment après avoir réagi avec certaines substances présentes dans l'air intérieur (O_3, OH, NO_3, etc.). Par exemple, le limonène émis par des produits ménagers peut réagir avec de l'ozone, et ainsi former du formaldéhyde et des particules ultrafines « secondaires » [12, 24]. Les concentrations mesurées en conditions réelles, comme celles sur lesquelles se sont basées ces ERS, présentent l'avantage d'intégrer les composés secondaires formés pendant les périodes de mesure (plusieurs heures).

Dans le cadre du champ retenu pour la démarche mise en œuvre, les principales limites incluent :
– la faible quantité de données disponibles à plusieurs étapes clés : données d'émission et d'usages applicables à la France pour la hiérarchisation initiale, valeurs de toxicité, etc ;
– la limite dans la complexité des données collectables par des sondages en ligne : malgré une étroite collaboration entre évaluateurs de risques et experts de sociétés de sondage, les résultats obtenus ont présenté des incohérences pour les produits ménagers, les seuls produits pour lesquels des données « multiproduits et multipièces » étaient demandées.

Enfin, les sondages réalisés sur les usages [8, 9, 25] indiquent que de nombreuses personnes n'ont pas conscience que des produits de consommation courante peuvent émettre des substances préoccupantes. Par exemple, en France, 58 % des utilisateurs d'encens déclarent que cette pratique soit améliore, soit n'a pas d'effet sur la qualité de l'air intérieur, et 27 % d'entre eux brûlent de l'encens dans l'objectif d'assainir l'air intérieur [9]. Cette observation générale pourrait notamment être liée aux stratégies marketing associées à ces produits ; ces stratégies peuvent inclure des campagnes publicitaires depuis des dizaines d'années et la vente de produits en pharmacie ou en commerces « biologiques », des lieux souvent associés à une image favorable à la santé. Dans ce contexte, il n'est pas étonnant de constater que, selon le type de produit considéré, 10 à 20 % des sondés rapportent un plus fort niveau d'utilisation que celui recommandé par le fabricant [26]. En ce sens, les risques évalués dans ces ERS pourraient être sous-estimés pour certains utilisateurs.

Conclusion

L'objectif des études présentées était de contribuer à identifier les produits de consommation présentant les risques sanitaires individuels les plus élevés. Après une phase de hiérarchisation des besoins d'études selon les risques attendus, réalisée à partir d'indicateurs de risques

Copyright © 2021 John Libbey Eurotext. Téléchargé par PRENOM VAUDELIN le 19/10/2021.

calculés sur la base des données d'émission disponibles dans la littérature scientifique et technique, la démarche d'ERS a été appliquée aux cas particuliers des désodorisants combustibles (encens, bougies parfumées), des produits ménagers et des désodorisants non combustibles (sprays, diffuseurs), en considérant les expositions par inhalation et les usages de type domestique.

Les ERS réalisées ont porté sur les risques chroniques, à seuil et sans seuil, ainsi que sur les risques aigus, caractérisés par une période d'exposition d'une heure, en cohérence avec les types d'usage observés, pour la voie inhalation.

Les ERS ont pu s'appuyer sur des concentrations mesurées en conditions réelles, dans une maison expérimentale, et sur des scénarios d'exposition déterministes, de type « moyen » et « pire cas raisonnable », élaborés à partir de sondages nationaux sur les usages des produits étudiés. À notre connaissance, ces ERS sont les premières à intégrer une telle combinaison. Dans le cas particulier des produits ménagers, l'ERS s'est basée sur des séances de ménage complètes, multipièces et multiproduits, ce qui est également une nouveauté dans la littérature scientifique.

Cette approche combinant successivement pré-hiérarchisation des produits, sondages de niveau national sur les usages, mesures en conditions réelles et évaluations quantitatives des risques sanitaires, pourrait être déclinée à d'autres types de produits et à d'autres types de substances. Par exemple, étudier les produits émetteurs de COSV, classiquement mesurés dans les environ- nements intérieurs (pesticides, retardateurs de flamme, phtalates, etc.), permettrait d'élargir le champ des études, de la qualité de l'air intérieur à la « qualité des environnements intérieurs ». Dans ce cas, plus encore que pour les COV, la question de la caractérisation des différents types de toxicités sera probablement un défi pour certaines substances.

Les résultats obtenus suggèrent, au regard des produits testés, des substances considérées et des hypothèses retenues dans ces ERS :

– les usages les plus courants correspondent à des risques individuels chroniques non préoccupants, vis-à-vis des expositions par inhalation, quel que soit le type de produit étudié, considéré individuellement ;

– les expositions les plus fortes ont besoin d'être réduites pour assurer l'absence de risque préoccupant, notamment en réduisant les émissions des produits les plus émissifs, quel que soit le type de produit étudié ;

– les encens et, dans une moindre mesure, les sprays désodorisants sont les produits de consommation présentant les risques individuels les plus élevés. Les substances d'intérêt prioritaire identifiées sont l'acroléine, le benzène, le formaldéhyde et les particules fines ($PM_{2,5}$).

Ces conclusions contrastent avec :

– la perception de nombreux utilisateurs, qui ne sont pas sensibilisés aux potentiels effets sanitaires associés aux substances émises par les produits de consommation ;

– les difficultés à établir des réglementations permettant de maîtriser les risques identifiés par les ERS réalisées [27] : à ce stade, les résultats obtenus ont conduit à l'obligation d'un étiquetage d'information pour les désodorisants combustibles [28] ;

– la priorité donnée à un étiquetage sur la composition des produits ménagers, inscrit dans le quatrième PNSE mis en consultation.

Au regard des résultats obtenus dans les ERS réalisées, le choix de prioriser les produits ménagers a donc intégré des logiques autres que celle du seul risque sanitaire. Pour une meilleure compréhension du public, ces autres logiques gagneraient à être mieux explicitées [29, 30]. ■

Remerciements et autres mentions

Les auteurs remercient (Ineris) Nathalie Velly pour son appui technique ; Vincent Grammont, Juliette Larbre, Céline Boudet, Muriel Ismert, Alexandre Albinet, Elsa Real, (Laboratoire de chimie de l'environnement [LCE]) Etienne Quivet, (Centre scientifique et technique du bâtiment [CSTB]) Mélanie Nicolas et François Maupetit, pour leurs contributions aux différentes étapes de la démarche.

Financement : ministère en charge de l'Environnement (ministère de la Transition écologique [MTE]) et Agence de la transition écologique (Ademe) ; **liens d'intérêts :** les auteurs déclarent ne pas avoir de lien d'intérêt.

Références

1. Boulanger G, Bayeux T, Mandin C, *et al*. Socio-economic costs of indoor air pollution: a tentative estimation for some pollutants of health interest in France. *Environ Int* 2017 ; 104 : 14-24.

2. Jantunen M, Oliveira Fernandes E, Carrer P, *et al*. *Promoting actions for healthy indoor air (IAIAQ)*. European Commission – Directorate General for Health and Consumers, 2011. http://ec.europa.eu/health/healthy_environments/docs/env_iaiaq.pdf

3. Sarigiannis DA, Karakitsios SP, Gotti A, *et al*. Exposure to major volatile organic compounds and carbonyls in European indoor environments and associated health risk. *Environ Int* 2011 ; 37 : 743-65.

4. Organisation mondiale de la santé (OMS). *WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants*. OMS, 2010. https://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0009/128169/e94535.pdf

5. Grammont V, Mandin C, Ramel M. *Données disponibles relatives aux émissions des produits de consommation courante dans l'environnement intérieur*. Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris), 2009.

Copyright © 2021 John Libbey Eurotext. Téléchargé par PRENOM VAUDELIN le 19/10/2021.

6. Larbre J, Boudet C, Bureau J. *Rapport préliminaire en vue de l'étiquetage des produits de grande consommation - Classement en fonction des expositions dans l'air intérieur*. Ineris, 2011.

7. Larbre J, Boudet C, Ramel M. *Deuxième rapport préliminaire en vue de l'étiquetage des produits de grande consommation Classement des bougies et des encens en fonction des émissions de composés organiques volatils et de particules dans l'air intérieur*. Ineris, 2011.

8. Institut français d'opinion publique (Ifop). *Les usages de désodorisants d'intérieur non combustibles*. Ministère en charge de l'environnement, 2017 (Disponible en annexe du rapport Karr G, Velly N, Ramel M. *Utilisation de désodorisants non-combustibles et qualité de l'air intérieur : enjeux sanitaires, substances d'intérêt, bonnes pratiques*. Ineris, 2020.) https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/Rapport-Ineris-20-200840-1997302-v1-MTES-BSE_DNC_complet.pdf

9. TNS Sofres. *Pollution intérieure – Utilisation des bougies et encens*. L'Express, 2017 (Disponible en annexe du rapport Karr G, Ismert M, Ramel M. *Utilisation d'encens et qualité de l'air intérieur : enjeux sanitaires, substances d'intérêt, bonnes pratiques*. Ministère en charge de l'environnement, 2014.) https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/Rapport-Ineris-DRC-14-144018-06268c-encens-vc-1455890922_0.pdf

10. Ribéron J, O'Kelly P. MARIA: an experimental tool at the service of indoor air quality in housing sector. Paper presented at: Indoor Air 2002 International Conference, Monterey, Canada, 2002

11. Nicolas M, Quivet E, Guillaume K, *et al*. *Exposition aux polluants émis par les bougies et les encens dans les environnements intérieurs – Émissions et risques sanitaires associés. Projet EBENE (APR ADEME CORTEA)*. Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB), Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris), Laboratoire de Chimie de l'Environnement (LCE), 2017. https://www.ademe.fr/ebene-exposition-polluants-emis-bougies-encens-environnements-interieurs

12. Karr G, Velly N, Ramel M. *Utilisation de produits ménagers et qualité de l'air intérieur : enjeux sanitaires liés à une séance de ménage, substances d'intéret et bonnes pratiques*. Ineris, 2019. https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/Rapport-DRC-19-179887-00900A_MAJ%20ERS%20ADOQ_complet.pdf

13. Karr G, Velly N, Ramel M. *Utilisation de désodorisants non-combustibles et qualité de l'air intérieur : enjeux sanitaires, substances d'intérêt, bonnes pratiques*. Ineris, 2020. https://www.ineris.fr/fr/utilisation-desodorisants-non-combustibles-qualite-air-interieur-enjeux-sanitaires-substances

14. Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie, Ministère des affaires sociales, de la santé et des droits des femmes. *Note d'information n° DGS/EA1/DGPR/2014/307 du 31 octobre 2014 relative aux modalités de sélection des substances chimiques et de choix des valeurs toxicologiques de référence pour mener les évaluations des risques sanitaires dans le cadre des études d'impact et de la gestion des sites et sols pollués*. Légifrance, 2014. http://circulaires.legifrance.gouv.fr/pdf/2014/11/cir_38905.pdf

15. Commission Européenne. *Agreed EU-LCI values – substances with their established EU-LCI values and summary fact sheets*. Commission Européenne, 2019. https://ec.europa.eu/docsroom/documents/33642/attachments/1/translations/en/renditions/native. Consulté le 23/10/2020

16. Ausschuss für Innenraumrichtwerte (soit en français, Comité pour des valeurs guides de l'intérieur). *Guide values (I and II, in milligrams per cubic meter of air) for the concentration of specific substances in indoor air*. 2019. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/4031/bilder/dateien/0_ausschuss_fur-innenraumrichtwerte_empfehlungen_und_richtwerte_20190128_en_003.pdf

17. National Research Council (NRC) – Committee on the institutional means for assessment of risks to public health. *Risk assessment in the Federal government: managing the process*. The National Academies Press, 1983.

18. Karr G, Ismert M, Ramel M. *Utilisation d'encens et qualité de l'air intérieur : enjeux sanitaires, substances d'intérêt, bonnes pratiques*. Ineris, 2015. https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/Rapport-Ineris-DRC-14-144018-06268c-encens-vc-1455890922_0.pdf.

19. Nicolas M, Karr G, Real E, *et al*. *Impact des produits d'entretien sur la qualité de l'air intérieur – Définition d'un protocole d'essais simple et harmonisé pour l'évaluation des émissions en composés volatils. Projet PEPS (APR ADEME/CORTEA)*. CB. Ineris, 2018. https://www.ademe.fr/resource-archive/294865

20. Nicolas M, Karr G, Quivet E, *et al*. *Émission de composés volatils et particulaires par les désodorisants non combustibles utilisés dans les environnements intérieurs : définition d'un protocole d'essai spécifique, évaluation des émissions et analyse des risques sanitaires. Projet PRESSENS (APR ADEME/CORTEA)*. CSTB, Ineris, LCE, 2020. www.ademe.fr

21. Trantallidi M, Dimitroulopoulou C, Wolkoff P, *et al*. EPHECT III: Health risk assessment of exposure to household consumer products. *Sci Total Environ* 2015 ; 536 : 903-13.

22. Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses). *Valeurs guides de qualité d'air intérieur – particules*. Anses, 2010. https://www.anses.fr/fr/system/files/AIR2004etVG007Ra.pdf

23. Bureau européen des Unions de Consommateurs (BEUC). *Emission of chemicals by air fresheners tests on 74 consumer products sold in Europe*. BEUC, 2005.

24. Rossignol S, Rio C, Ustache A, *et al*. The use of a housecleaning product in an indoor environment leading to oxygenated polar compounds and SOA formation: Gas and particulate phase chemical characterization. *Atmos Environ* 2013 ; 75 : 196-205.

25. Steinemann A. Ten questions concerning air fresheners and indoor built environments. *Build Environ* 2017 ; 111 : 279-84.

26. Johnson A, Lucica E. *Survey on indoor use and use patterns of consumer products in EU member states*. Ipsos, 2012.

27. Anses. *Avis de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail relatif à une demande d'avis sur un projet de décret relatif à l'étiquetage des produits désodorisants à combustion sur les informations de sécurité pour les utilisateurs*. Saisine n°« 2016-SA-0256 ». Anses, 2017.

28. Journal officiel de la République française n°0110 du 11 mai 2017. *Décret n° 2017-946 du 10 mai 2017 relatif à l'étiquetage des produits désodorisants à combustion sur les informations de sécurité pour l'utilisateur*. 2017.

29. Noiville C. *Du bon gouvernement des risques: le droit et la question du risque acceptable*. Presses universitaires de France, 2015.

30. Karr G, Boudet C, Le-Gall AC, *et al*. Aide au choix de substances prioritaires en santé environnementale: un processus associant un avis d'expert et une analyse multicritère participative. *Environ Risque Sante* 2014 ; 13 : 135-43.

L’article suivant est présenté et analysé à la section 2.F.

Karr G, Prete G, Duboc S et al. Management of links of interest in European Union expertise authorities dealing with plant protection products: comparative analysis and recommendations. Environmental Sciences Europe 2023; 35(1) : 96. DOI : https://doi.org/10.1186/s12302-023-00760-1.

Environmental Sciences Europe

RESEARCH

Open Access

Management of links of interest in European Union expertise authorities dealing with plant protection products: comparative analysis and recommendations

Guillaume Karr[1,5], Giovanni Prete[2,5], Soraya Duboc[3,4,5] and Denis Zmirou-Navier[4,5*]

Abstract

Background To ensure a high level of public health and environmental protection, authorities that deliver scientific expertise to inform decision-makers and the public at large need to be independent from external stakeholders and free of conflicts of interest. This independence requires effective rules for managing links of interest (LoIs) and a high level of transparency, including publication of declarations of interest (DoIs) where appropriate. In the particular case of plant protection products (PPPs) within the European Union, these requirements should apply to all Competent Authorities contributing to the marketing authorization processes.

Methods A comparative analysis of LoIs management procedures was performed on a selection of ten National Competent Authorities from different member states (NCAs). This analysis was based on (i) the identification of 17 criteria aiming at characterizing good practices for LoIs management; (ii) a survey of ten NCAs, based on an analysis of their institutional websites and their responses to official mail requests.

Results The comparative analysis showed: (i) a frequent lack of transparency of NCAs regarding their procedures for managing LoIs; (ii) a significant heterogeneity between the NCAs' LoIs management rules, even though they are in charge of comparable missions regarding the marketing of PPPs; (iii) substantial gaps between the LoIs management procedures adopted by several NCAs and the good practices that are promoted by EFSA.

Current limits on their practices regarding LoIs management might open ways for undue external influences on scientific expertise, and ultimately impact negatively the risk management options adopted by national or European authorities. Limitations of this study and its extension for a more thorough overview of the current LoIs management practices are also discussed.

Conclusions LoIs management and transparency rules need to be improved across NCAs, given their contribution as (co-)rapporteurs or peer reviews participants to the health and environmental risk assessment steps of the EFSA processes. To this end, a common minimum set of rules should be defined by EFSA; recommendations are proposed, based on the best practices implemented by the investigated NCAs. Such progress would contribute promoting high-quality unbiased scientific expertise and enhance EU citizens' trust.

*Correspondence:
Denis Zmirou-Navier
zmirou.denis@orange.fr
Full list of author information is available at the end of the article

Springer Open

© The Author(s) 2023. **Open Access** This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/.

Keywords Links of interest, Declaration of interest, Conflicts of interest, Safety agencies, Code of conduct, Independence, Risk management, Risk assessment, Pesticides, Plant protection products

Background

Over the last decades, the influence of corporate interests on environmental and public health regulations has attracted growing concern and public attention. Scientists, public authorities and NGOs have stressed the need to limit the influence of corporations on scientific expertise [1], especially multinational companies marketing products that are potentially toxic to health and the environment. A growing body of work describes the many forms the influence strategies of those external stakeholders can take (e.g., hiding scientific results, creating artificial scientific debates, promoting alternative research fields) and provides theoretical concepts to analyze this influence, e.g., doubt manufacturing [2–5], ghostwriting [6, 7], regulatory capture [8, 9], revolving door processes [10–12], production of ignorance [13, 14], undone science [15, 16], or funding bias [17–23]. Problematic corporate influence has been described in various sectors, including, among others, tobacco [24–26], chemicals [27–30], climate change [3, 4], nutrition [19, 31, 32], asbestos [4, 33], and pesticides [11, 34–37].

In response to these concerns, and to ensure a high level of public health and environmental protection, authorities that deliver scientific expertise to inform decision-makers and the public at large have adopted procedures that are supposed to guarantee their independence. Most importantly, regulatory agencies have promoted procedures aiming at identifying and managing the links of interests (LoIs) of the actors involved in the expertise processes, in particular procedures for disclosing the financial relationships between experts and industries, in order to prevent conflicts of interest. In the European Union (EU), within several public agencies, the application of rules for the management of LoIs (also simply called "interests") is one of the means used to promote impartiality and, in particular, to reduce the risks of corporate influence. This promotion of LoIs management procedures has been directly linked to that of transparency [38]. Indeed, from the 1990s onward, a movement advocating for more transparency in scientific and public life has been growing in close connection with the rise of the European regulatory agencies system. This movement promotes both expanded access to data of public interest and the unveiling of non-public relationships of officials or experts with private interests (e.g., in the form of disclosure policies).

This article explores how several national expertise agencies take into account the issue of links of interest and the requirement of transparency, based on a particularly controversial case, that of the regulation of plant protection products (PPPs). It analyzes the procedures put in place by a selection of EU expertise agencies involved in the evaluation of active substances and PPPs within the EU, and the accessibility of information on these procedures. A large number of regulations, the main ones being Directive 2009/128/EC and Regulation (EC) 1107/2009, covers the delivery of marketing authorizations (MAs) for PPPs. The regulatory framework determines that the active substances of PPPs be subject to a centralized approval procedure at the EU level. Along this procedure, the European Food Safety Authority (EFSA) delivers scientific opinions to help the European Commission decide whether to approve (or renew) active substances or not. EFSA's opinion is based on scientific evaluation reports prepared by National Competent Authorities of different member states (NCAs), appointed as rapporteurs. Subsequently, the commercial formulations containing the active substances approved at EU level are subject to a national authorization procedure, which is also based on NCAs scientific evaluations.

Thus, EFSA's scientific expertise plays a central role in PPPs regulation. Today, aiming at "*building and maintaining trust*" in its independence, EFSA set the objective of ensuring "*a high level of transparency across all its activities, [including] independence-related processes*" [39]. It presents transparency as a "*key value*" [40] and claims that "*openness and transparency of the EU risk assessment process in the food chain contributes to greater legitimacy of the Authority in pursuit of its mission, strengthens confidence in the Authority's work and, ultimately, ensures its democratic accountability vis-à-vis consumers, business operators and the public*" [41]. EFSA also promotes a good LoIs management as a way to improve the reliability of its work. In 2018, following numerous criticisms regarding its LoIs management policy by the European Parliament [42, 43], by the European Court of Auditors [44], and by Non-Governmental Organizations [10, 45], EFSA updated its rules regarding competing interest management [46]. NCAs also play a central role in PPPs regulation. Indeed, as pointed out above, EFSA's expertise is largely based on their contributions—acting either as *Rapporteur states* for active substances or during the *Peer review* process. This raises the question of the rules NCAs adopt in terms of LoIs management and transparency, and of their consistency with EFSA guidelines.

The research presented in this article was conducted in response to preliminary findings by the French Commission for Deontology and Alerts in Public Health and the Environment (*Commission nationale de la déontologie et des alertes en matière de santé publique et d'environnement*—cnDAspe). The cnDAspe took the initiative, under its legal missions (see Additional file 1), to investigate the expertise process leading to the delivery of MAs for PPPs within the EU. It identified substantial differences between NCAs and gaps compared to EFSA's good practices [46]. It issued an opinion stating that, in order to create a context that promotes unbiased expertise in support to EFSA, and in view to enhance European citizens' trust, LoIs management rules should be (i) harmonized across the contributing NCAs, especially with regard to transparency; and (ii) in line with the best available standards [47]. To contribute to this public interest objective, members of the cnDAspe and the first author of this article have undertaken a more extensive comparative analysis of the rules applied among a variety of EU NCAs for PPPs assessment regarding LoIs management. To our knowledge, this type of comparative analysis has not yet been performed to date. Its objectives are: (i) to draw the attention of experts, Authorities, and European elected representatives to the current state of LoIs management in the NCAs supporting EFSA's remit; (ii) to identify the best practices currently implemented by the investigated NCAs; (iii) to propose a set of minimum common rules, to which EFSA could require the NCAs to commit. These rules would include public access requirements on the NCAs websites, in a transparent manner.

Materials and methods

Seventeen criteria were selected to characterize key LoIs management practices, and were classified into three categories (Tables 1, 2, 3): (1) *Organization of the LoIs management*: these criteria describe the organization implemented within the investigated NCAs, with regard to LoIs; (2) *Accessibility*: these criteria describe how accessible are the different components of the LoIs management systems, e.g., DoIs, lists of committee members; and (3) *LoIs assessment*: these criteria describe how LoIs are evaluated, e.g., intensity graduation, duration of the past periods covered by the DoI. The criteria selection is based on (i) rules now in effect at EFSA [46]; (ii) good practices observed in certain NCAs; and (iii) proposals from members of the cnDAspe. These criteria will be considered as good reference practices in the remainder of this paper.

Additional file 2 describes the selected criteria in detail. The file presents these criteria in a non-hierarchical way. Yet, it is clear that certain criteria are essential and are minimum prerequisites for LoIs management and transparency. For example, the existence of disclosure policies and the verification of DoIs are essential. Easy and free access to DoIs by the public can also be considered as a minimum requirement for transparency.

Ten NCAs were selected (Table 4) so as to (i) obtain a diverse sample of member states, taking into account the EU regulatory zonal system of authorization for PPPs, divided into three zones: North, Central and South [48]; (ii) include the NCAs that co-produced the draft renewal assessment report for glyphosate, as part of the 2021 renewal regulatory process, because the glyphosate risk assessments have been overtly criticized, especially with regard to potential conflict of interests (CoI) issues [34–36].

In addition, EFSA and the European Chemicals Agency (ECHA) were also examined, as European-level Competent Authorities, to provide an indicative benchmark (Additional file 2).

For each NCA investigated, the selected criteria were filled in (i) on the basis of the information available on the NCA institutional website, collected with a systematic method including searching predefined keywords with the NCA website search engine (see Additional file 2). The free online translation tool Google Translate was used where necessary; (ii) distinguishing between three types of individuals ('actors' of the expertise processes): external experts (EE), internal experts (IE), and management officers (MO).

Then, each NCA was sent the retrieved results specific to the information available on its website, with an official letter from the cnDAspe (Additional file 1), requesting the NCA to (i) provide relevant information not found online, if deemed appropriate; (ii) correct possible misunderstandings and inaccuracies. The cnDAspe letter specified a time limit of one month before publication of the results online [47]. The corrections made were traced, noting whether they were justified by a NCA internal document sent to the cnDAspe, or only by a formal letter signed by an authoritative person within the investigated NCA (Additional file 2).

Results

For the ten selected NCAs, the retrieved information is detailed in Tables 1, 2, 3 (for ECHA and EFSA, see Additional file 2). The overall data collection was carried out between February and December 2022; the collection period specific to each NCA is mentioned with each set of results.

EFSA and five NCAs replied to the cnDAspe letter: Anses (France), BfR (Germany), Ctgb (Netherlands), KEMI (Sweden), and Nébih (Hungary). None of these NCAs called into question the approach and the method used by the cnDAspe. Needs for corrections or additions

Table 1 Comparative analysis for the 'Organization of the LoIs management' criteria category

Selected criteria for assessing the management of links of interest\ Competent Authorities		Actors	Center zone					North zone		South zone		
			Germany	Netherlands	Poland	Hungary	Czech Republic	Sweden	Finland	France	Italy	Bulgaria
			BfR	Ctgb	Ministry of Agriculture	Nébih	ÚKZÚZ (CISTA)	KEMI	Tukes	Anses	Ministero della Salute	БАБХ (BFSA)
Period of consultation of the authority's website (month/year)			**05/2022**	**03–04/2022**	**09/2022**	**04–05/2022**	**10/2022**	**04/2022**	**08/2022**	**03/2022**	**11/2022**	**12/2022**
Receipt by the cnDAspe of a response letter (yes/no) and date of receipt			**Yes, 29/06/2022**	**Yes, 29/06/2022**	**No**	**Yes, 24/06/2022**	**No**	**Yes, 20/06/2022**	**No**	**Yes, 22/06/2022**	**No**	**No**
1	Obligation to complete a DoI prior to recruitment (YES/NO)	EE	YES	YES	nf	nf	nf	nf	nc	YES	YES	nf
		IE	nf	YES	nf	nf	nf	nf	nf	YES	YES	nf
		MO	nf	YES	nf	nf	nf	nf	nf	YES	YES	nf
2	Minimum frequency requirement to update DoI (/year)	EE	nf	1	nf	nf	nf	nf	nc	1	nf	nf
		IE	nf	1	nf	-	nf	nf	nf	1	nf	nf
		MO	nf	1	nf	-	nf	nf	nf	1	nf	nf
3	Requirement to update DoI in case of significant change (YES/NO) If so, associated deadline (months)	EE	YES: -	YES: -	nf	nf	nf	nf	nc	YES: -	0,5	nf
		IE	nf	YES: -	nf	YES	nf	nf	nf	YES: -	0,5	nf
		MO	nf	YES: -	nf	YES	nf	nf	nf	YES: -	0,5	nf
4	Structure in charge of DoI analysis — Independent external entity (YES/NO)	EE	nf	NO	nf	nf	nf	nf	nc	NO	NO	nf
		IE	nf	NO	nf	nf	nf	nf	nf	NO	NO	nf
		MO	nf	nf	nf	nf	nf	nf	nf	NO	NO	nf
	Internal entity + stakeholders (YES/NO)	EE	YES	NO	nf	nf	nf	nf	nc	NO	NO	nf
		IE	nf	NO	nf	nf	nf	nf	nf	NO	NO	nf
		MO	nf	nf	nf	nf	nf	nf	nf	NO	NO	nf
	Internal entity (YES/NO)	EE	nf	YES	nf	nf	nf	nf	nc	YES	YES	nf
		IE	nf	YES	nf	nf	nf	nf	nf	YES	YES	nf
		MO	nf	nf	nf	nf	nf	nf	nf	YES	YES	nf

Table 1 (continued)

Selected criteria for assessing the management of links of interest\ Competent Authorities		Actors	Center zone					North zone		South zone		
			Germany	Netherlands	Poland	Hungary	Czech Republic	Sweden	Finland	France	Italy	Bulgaria
			BfR	Ctgb	Ministry of Agriculture	Nébih	ÚKZÚZ (CISTA)	KEMI	Tukes	Anses	Ministero della Salute	БАБХ (BFSA)
Period of consultation of the authority's website (month/year)			05/2022	03–04/2022	09/2022	04–05/2022	10/2022	04/2022	08/2022	03/2022	11/2022	12/2022
Receipt by the cnDAspe of a response letter (yes/no) and date of receipt			Yes, 29/06/2022	Yes, 29/06/2022	No	Yes, 24/06/2022	No	Yes, 20/06/2022	No	Yes, 22/06/2022	No	No
5	Check on the accuracy of the DoIs contents	Exhaustive (YES/NO) EE	nf	NO	nf	nf	nf	nf	nc	YES	nf	nf
		IE	nf	NO	nf	nf	nf	nf	nf	YES	nf	nf
		MO	nf	NO	nf	nf	nf	nf	nf	YES	nf	nf
		By sampling (YES/NO) EE	nf	NO	nf	nf	nf	nf	nc	YES	nf	nf
		IE	nf	NO	nf	nf	nf	nf	nf	YES	nf	nf
		MO	nf	NO	nf	nf	nf	nf	nf	YES	nf	nf
		Minimum frequency (/year) EE	nf	NO	nf	nf	nf	nf	nc	1	nf	nf
		IE	nf	NO	nf	nf	nf	nf	nf	1	nf	nf
		MO	nf	NO	nf	nf	nf	nf	nf	1	nf	nf
6	How long is the DoI archived (years)		nf	nf	nf	*50*	nf	nf	nf	10	nf	nf

Table 1 (continued)

Selected criteria for assessing the management of links of interest\ Competent Authorities		Actors	Center zone					North zone		South zone		
			Germany	Netherlands	Poland	Hungary	Czech Republic	Sweden	Finland	France	Italy	Bulgaria
			BfR	Ctgb	Ministry of Agriculture	Nébih	ÚKZÚZ (CISTA)	KEMI	Tukes	Anses	Ministero della Salute	БАБХ (BFSA)
Period of consultation of the authority's website (month/year)			05/2022	03–04/2022	09/2022	04–05/2022	10/2022	04/2022	08/2022	03/2022	11/2022	12/2022
Receipt by the cnDAspe of a response letter (yes/no) and date of receipt			Yes, 29/06/2022	Yes, 29/06/2022	No	Yes, 24/06/2022	No	Yes, 20/06/2022	No	Yes, 22/06/2022	No	No
7	Obligations of experts and personnel before a new activity (consultant, other employer, advocating NGO…)	Prior agreement (YES/NO) EE	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc
		IE	nf	YES	nf	nf	nf	nf	nf	YES	nf	nf
		MO	nf	YES	nf	nf	nf	nf	nf	YES	nf	nf
		Prior information (YES/NO) EE	nf	YES	nf	nf	nf	nf	nc	NO	nf	nf
		IE	nf	YES	nf	nf	nf	nf	nf	YES	nf	nf
		MO	nf	YES	nf	nf	nf	nf	nf	YES	nf	nf
		Duration of the period during which the new duties must be notified and publicly available online (years) EE	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc
		IE	nf	NO	nf	nf	nf	nf	nf	NO	nf	nf
		MO	nf	NO	nf	nf	nf	nf	nf	NO	nf	nf
8	Minimum period before a new activity with a "major" interest can be accepted (years)	EE	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc
		IE	nf	nf	nf	nf	nf	nf	nf	3	3	nf
		MO	nf	NO	nf	nf	nf	nf	nf	3	3	nf

Table 1 (continued)

Selected criteria for assessing the management of links of interest\ Competent Authorities		Actors	Center zone					North zone		South zone		
			Germany	Netherlands	Poland	Hungary	Czech Republic	Sweden	Finland	France	Italy	Bulgaria
			BfR	Ctgb	Ministry of Agriculture	Nébih	ÚKZÚZ (CISTA)	KEMI	Tukes	Anses	Ministero della Salute	БАБХ (BFSA)
Period of consultation of the authority's website (month/year)			**05/2022**	**03–04/2022**	**09/2022**	**04–05/2022**	**10/2022**	**04/2022**	**08/2022**	**03/2022**	**11/2022**	**12/2022**
Receipt by the cnDAspe of a response letter (yes/no) and date of receipt			**Yes, 29/06/2022**	**Yes, 29/06/2022**	**No**	**Yes, 24/06/2022**	**No**	**Yes, 20/06/2022**	**No**	**Yes, 22/06/2022**	**No**	**No**
9	Regular audit of the implementation of the rules for managing links of interest	Via independent external entity (YES/NO)	nf	YES	nf	nf	nf	nf	nf	NO	YES	nf
		Via internal entity + stakeholders (YES/NO)	nf	NO	nf	nf	nf	nf	nf	NO	NO	nf
		Via internal entity (YES/NO)	nf	NO	nf	nf	nf	nf	nf	YES	NO	nf
		Minimum frequency (YES/NO)	nf	5	nf	nf	nf	nf	nf	1	1	nf

Table 2 Comparative analysis for the *'Accessibility' criteria category*

Selected criteria for assessing the management of links of interest \ Competent Authorities			Actors	Center zone					North zone		South zone		
				Germany	Netherlands	Poland	Hungary	Czech Republic	Sweden	Finland	France	Italy	Bulgaria
				BfR	Ctgb	Ministry of Agriculture	Nébih	ÚKZÚZ (CISTA)	KEMI	Tukes	Anses	Ministero della Salute	БАБХ (BFSA)
Period of consultation of the authority's website (month/year)				05/2022	03–04/2022	09/2022	04–05/2022	10/2022	04/2022	08/2022	03/2022	11/2022	12/2022
Receipt by the cnDAspe of a response letter (yes/no) and date of receipt				Yes, 29/06/2022	Yes, 29/06/2022	No	Yes, 24/06/2022	No	Yes, 20/06/2022	No	Yes, 22/06/2022	No	No
10	Internet publicity of the DoI form (yes/no)			YES	YES	NO	NO	NO	NO	NO	YES	YES	NO
11	Accessibility of the criteria for analyzing links of interest	Open access on the Internet (YES/NO)		NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	YES	NO	nf
		On request (YES/NO)		nf	nf	nf	nf	nf	nf	nf	NO	nf	nf
12	Accessibility of experts' and staff's DoI	Open access on the Internet (YES/NO)	EE	YES	NO	nf	nf	nf	NO	nc	YES	YES	nf
			IE	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	YES	nf	nf
			MO	NO	YES	NO	NO	NO	NO	NO	YES	nf	NO
		On request (YES/NO)	EE	nf	nf	nf	nf	nf	nf	nc	NO	NO	nf
			IE	nf	nf	nf	nf	nf	nf	nf	NO	nf	nf
			MO	nf	nf	nf	nf	nf	nf	nf	NO	nf	Nf
13	Accessibility of the DoI of the members of the entity in charge of analyzing experts' and staff's DoI	Open access on the Internet (YES/NO)	EE	NO	YES	nf	nf	nf	NO	nc	YES	nf	Nf
			IE	NO	YES	NO	NO	NO	NO	NO	YES	nf	Nf
			MO	NO	nf	NO	NO	NO	NO	NO	YES	nf	Nf
		On request (YES/NO)	EE	nf	NO	nf	nf	nf	nf	nc	NO	nf	Nf
			IE	nf	NO	nf	nf	nf	nf	nf	NO	nf	Nf
			MO	nf	nf	nf	nf	nf	nf	nf	NO	nf	Nf

Table 2 (continued)

Selected criteria for assessing the management of links of interest \ Competent Authorities		Actors	Center zone					North zone		South zone		
			Germany	Netherlands	Poland	Hungary	Czech Republic	Sweden	Finland	France	Italy	Bulgaria
			BfR	Ctgb	Ministry of Agriculture	Nébih	ÚKZÚZ (CISTA)	KEMI	Tukes	Anses	Ministero della Salute	БАБХ (BFSA)
Period of consultation of the authority's website (month/year)			05/2022	03–04/2022	09/2022	04–05/2022	10/2022	04/2022	08/2022	03/2022	11/2022	12/2022
Receipt by the cnDAspe of a response letter (yes/no) and date of receipt			Yes, 29/06/2022	Yes, 29/06/2022	No	Yes, 24/06/2022	No	Yes, 20/06/2022	No	Yes, 22/06/2022	No	No
14	Accessibility of the list of members for all expert committees and governance bodies	Open access on the Internet (YES/NO)	YES	nf	nf	nf	nf	nf	nf	YES	YES	nf
		On request (YES/NO)	NO	nf	nf	nf	nf	nf	nf	NO	NO	nf

Table 3 Comparative analysis for the 'LoIs assessment' criteria category

Selected criteria for assessing the management of links of interest \ Competent Authorities	Actors	Center zone					North zone		South zone		
		Germany	Netherlands	Poland	Hungary	Czech Republic	Sweden	Finland	France	Italy	Bulgaria
		BfR	Ctgb	Ministry of Agriculture	Nébih	ÚKZÚZ (CISTA)	KEMI	Tukes	Anses	Ministero della Salute	БАБХ (BFSA)
Period of consultation of the authority's website (month/year)		**05/2022**	**03–04/2022**	**09/2022**	**04–05/2022**	**10/2022**	**04/2022**	**08/2022**	**03/2022**	**11/2022**	**12/2022**
Receipt by the cnDAspe of a response letter (yes/no) and date of receipt		**Yes, 29/06/2022**	**Yes, 29/06/2022**	**No**	**Yes, 24/06/2022**	**No**	**Yes, 24/06/2022**	**No**	**Yes, 22/06/2022**	**No**	**No**
15 Duration of past period covered by the DoI (years)		nf	5	nf	nf	nf	nf	nf	5	3	nf
16 Duration of the past period taken into account for the analysis of LI (years)		nf	5	nf	nf	nf	nf	nf	5	3	nf
17 Management of LI differentiated according to the intensity of LI (YES/NO)	EE	nf	NO	nf	nf	nf	nf	nc	YES	nf	nf
	IE	nf	NO	nf	nf	nf	nf	nf	YES	nf	nf
	MO	nf	NO	nf	nf	nf	nf	nf	YES	nf	nf

DoI(s) Declaration(s) of Interest, *LoI(s)* Link(s) of Interest, *nf* not found (using our systematic collection method), *nc* not concerned, e.g., Authorities not requesting any external expert, in any evaluation, any expertise, any committee, any scientific council or equivalent, etc. *EE* external expert, *IE* internal expert, *MO* management officer; numbers: see the specific description of each criterion in the left column of the tables

Table 4 Investigated competent authorities

Regulatory Zone	Authority		Country	Acronym
	National language	English		
North ($n=2$)	Kemikalieinspektionen	Swedish Chemicals Agency	Sweden	KEMI
	Turvallisuus- ja kemikaalivirasto	Finnish Safety and Chemicals Agency	Finland	Tukes
Center ($n=5$)	Bundesinstitut für Risikobewertung	German Federal Institute for Risk Assessment	Germany	Bfr
	College voor de toelating van gewasbeschermingsmiddelen en biociden	Dutch Board for the Authorisation of Plant Protection Products and Biocides	Netherlands	Ctgb
	Ministerstwo Rolnictwa i Rozwoju Wsi	Ministry of Agriculture and Rural Development	Poland	-
	Nemzeti Élelmiszerlánc-biztonsági Hivatal	National Food Chain Safety Office	Hungary	Nébih
	Ústřední kontrolní a zkušební ústav zemědělský	Central Institute for Supervising and Testing in Agriculture	Czech Republic	ÚKZÚZ
South ($n=3$)	Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail	French Agency for Food, Environmental and Occupational Health & Safety	France	Anses
	Българска агенция по безопасност на храните	Bulgarian Food Safety Agency	Bulgaria	BFSA
	Ministero della Salute	Ministry of Health	Italy	-

were mentioned (Additional file 2) in a small number of cases: of the five responses received (corresponding to 5 NCAs × 17 criteria = 85 filled-in criteria in total), corrections or additions were made for 7 filled-in criteria (approximately 8%).

The BfR considers that EFSA's DoIs good practice is not relevant for its agents, mostly civil servants, who are subject to specific German legal obligations (not detailed in the BfR response), a stand that may be challenged, EU-level requirements being considered as minimum requirements to be applied in each Member State. This disagreement was also traced (Additional file 2).

Three main findings can be drawn from the comparative analysis:

(i) A frequent lack of transparency on the part of NCAs regarding their procedures for managing LoIs: LoIs management procedures are often absent from agency websites. Overall, the result "nf" (not found) represents 67% of the tables data, this proportion reaching 52% for the NCAs that replied to the cnDAspe letter. These proportions suggest, as a whole, a low level of transparency and a limited effort to remedy it, even in the case of specific questions directly asked by a public entity officially commissioned on LoIs management. Illustrative is the response letter of one of the investigated NCAs, for which none of the criteria could be filled in, stating that "*We have no comments on the results [...] before the publication*". This situation can be reasonably considered as not responding to the "*high level of transparency across all activities*" [39] mentioned by EFSA, and as unfavorable for "*building and maintaining trust*" in the independence of the studied NCAs and for ensuring their "*democratic accountability*" [41].

(ii) A significant heterogeneity between the NCAs' official procedures on LoIs management rules. Discrepancies relate to significant issues, e.g., check on the accuracy of the DoIs content; audits of the implementation of the LoIs management rules; duration of the past period considered for the LoIs analysis when hiring or accrediting new experts; staff obligations before accepting a new activity. This heterogeneity also applies to transparency practices, e.g., accessibility of the list of members for all expert committees and governance bodies, and of the corresponding DoIs; accessibility of the criteria for LoIs analysis. More specifically, the list of members for all expert committees and governance bodies could be found only for three NCAs out of ten, and the criteria for LoIs analysis was found for only one NCA. This situation is not compatible with the similar functions NCAs play in the EU MA process for PPPs, where free movement of authorized products is a key principle. This heterogeneity might have an influence on PPPs risk regulation and, ultimately, on the level of protection provided to people (workers, operators, residents, by-standers, consumers) and to the environment. This level of protection should not vary substantially depending on which NCAs were selected to participate to the regulatory risk assessments.

(iii) Substantial gaps between the LoIs management procedures adopted by several NCAs and the good practices promoted by EFSA [46]. For instance: the DoIs of the external experts could be found for only three NCAs out of ten; the DoIs of the management officers could be found for only two; the explicit mention of a check on the accuracy of the DoIs content could be found for only one. However, these procedures are part of the good practices promoted by EFSA.

This study also aimed at proposing a common minimum set of rules that EFSA could require the NCAs to commit to. We present our proposal in the Discussion section, as a logical consequence of our analysis on how the NCAs actually implement good practices.

Discussion

This section will successively discuss the main results of the comparative analysis, the limitations of the study, and recommendations to improve the management of LoIs in the EU and to strengthen the confidence of citizens in their institutions and expertise agencies.

The main results of this study are associated with significant issues regarding deontology and effectiveness of EU public policies. First, investigated NCAs significantly lack transparency on their LoIs management practices, which should be an essential component of their working process. A large amount of basic information on LoIs management turns out not to be easily available on their institutional website. The low number of responses received by the cnDAspe, an independent and public body, officially mandated by the French authorities to make proposals for improving deontology practices in expertise processes, is surprising and worrying. Those observations obviously do not meet the legitimate expectations of the general public regarding transparency. Secondly, our work shows high degree of heterogeneity in NCAs practices, which might result in significant differences in the conclusions of expertise processes. These differences may limit the achievement of the EU's objective of ensuring a high level of human health protection in all its policies and actions [49]. An illustration of this issue is that of the renewal of glyphosate in 2017, which was marked by serious doubts of interference by industrial interests [50]. Because NCAs opinions and evaluations play a central role in PPPs regulation, poor LoIs management at the national level may yield negative consequences on the EU MA process for PPPs in general; it weakens the expertise of EFSA, whose work depends in part on that of the NCAs. Finally, our work suggests that essential procedures for assuring absence of CoI might not be implemented in certain NCAs, as per the best practices detailed in EFSA guidelines [46]. This situation weakens the expertise of EFSA, because of the contribution of the NCAs as (co-)rapporteurs or peer reviews participants to the health and environmental risk assessment steps of the EFSA processes, and raises concern vis-à-vis possibilities of external inappropriate influences on PPP regulation.

The research presented in this article has several limitations. First, it is based on a simple method of data collection: to understand how NCAs manage LoIs, we gathered information by exploring their websites in a first step. This approach has several shortcomings: websites are not always up to date; English versions of websites do not always exist and are sometimes more limited than their national counterparts; the use of translation applications for website exploration when necessary is less effective in finding the information needed. However, this method has several advantages: it is easily reproducible; it gives a general picture of the information that is readily available to the public who understands the language in which NCAs' websites are written (or in English, when NCAs have English version of their websites). In addition, mail exchanges, with the support of an official public body (cnDAspe), gave the NCAs the opportunity to provide complements and corrections to the data retrieved from their website, leading, if necessary, to more accurate characterization of the LoIs management rules. We cannot rule out the hypothesis that some NCAs might have in-depth but non-open access LoIs management rules. Yet, none of the response messages contested or challenged the method adopted by the cnDAspe and the way it had converted the information it could retrieve. The main criticism received came from the BfR, and did not relate to the method, but to the applicability of certain criteria to BfR's type of organization and personnel. We view the few corrections requested by the responding NCAs, all based on information not available online, as an indirect evidence of reliability of the data presented in this paper.

Secondly, the research analyzes the procedures that NCAs declare have in place to manage LoIs, but it does not inform on NCAs actual practices. This has two main implications. On the one hand, practices might deviate from adopted procedures. A qualitative survey, using interviews and observations, would allow an assessment of possible implementation gaps; we have not conducted it, but it is worthwhile being considered. The article shows, however, that even with regard to formal procedures, there is room for improvement in the ways NCAs manage LoIs and transparency. On the other hand, formal procedures for managing LoIs are sometimes unclear or difficult to interpret. As a result, some of the criteria used were sometimes difficult to include in the analysis and in the comparison tables, e.g., in case of incomplete data with an unspecified scope. However, most of the criteria were clear and the uncertainties do not question the main conclusions of the study. Overall, our work may be viewed as an indirect and approximate analysis, yet informative, of the existing LoIs management rules in each NCA taking part to the EU MA process for PPPs. It could be completed subsequently, taking into account the other NCAs involved in the PPP regulatory processes and additional relevant criteria.

Improving the management of LoIs in EU expertise agencies is just one of many actions [51–54] (e.g., maintaining public funding for research to reinforce regulatory expertise, protecting scientific editors from industry influence, etc.) that need to be taken to achieve the goal of protecting regulation from undue corporate influence [2, 3, 13, 55–57]. Addressing the weaknesses shown by our study—i.e., lack of transparency, heterogeneity, gaps with good practices—is nevertheless very important. Not only would it reinforce the quality of the EU expertise system, but it could also contribute to improve public confidence in European institutions on the subject of environmental health and food safety. Pesticide residues in food top the list of food safety-related concerns among Europeans [58]. Yet, as for information on that topic and other risks [58, 59], between a quarter and a third of European citizens (2019: 35%; 2022: 28%) do not trust the European institutions. Authors have suggested there is a link between this distrust and lack of transparency [45, 60]. Before considering the option of "coping with mistrust" [61], the EU should continue its efforts to enhance public confidence. Along with other evolution (e.g., public engagement [62]), increasing transparency and robustness of LoIs management could help.

In order to consolidate LoIs management in the NCAs that contribute to EFSA's work on PPP, the authors of this paper state that a common minimum set of good practices should be targeted. It could include some of the LoIs management rules already in place in some NCAs: (i) taking into account a 5-year period for LoIs analysis, as implemented at Ctgb; (ii) including regular frequentation relationships (e.g., cohabitants, close family members, close colleagues, co-members of advocating associations, etc.) in the scope of the persons considered by DoIs, as implemented at the Italian Ministry of Health; (iii) managing LoIs according to their degree of intensity, as implemented at Anses; (iv) auditing the LoIs management rules once per year by an external independent entity, as exposed by the Italian Ministry of Health; (v) requiring the regular update of the DoIs, with a yearly minimum frequency, and in case of significant change, as implemented at Ctgb. In this latter case, a maximum time limit of 15 days could be specified, as implemented at the Italian Ministry of Health; (vi) checking the accuracy of the DoIs content, e.g., against the information presented in the resume transmitted by the examined person, and against public information available on the Internet, as implemented at Anses on samples of DoIs; (vii) requiring a prior agreement before a member of senior staff could accept a new activity, as implemented at Ctgb, with a 3-year minimum period before accepting a new activity associated with a 'major' LoI, as implemented at the Italian Ministry of Health; (viii) ensuring an open access on the Internet to the criteria used for analyzing expert's and staff"s LoIs, and to the list of members of all expert committees and governance bodies, as implemented at Anses. Insofar as these rules are already adopted in some NCAs, one may consider that they could be applied in all NCAs because they have comparable missions. Improving harmonization based on common minimum rules under the auspices of EFSA is essential. Subsidiarity should not be opposed to such endeavor given the consequences of local weaknesses on the EU-level protection of health and the environment. This harmonizing approach is promoted in other EU MA processes. For instance, the European Medicines Agency's LoIs management rules apply to all competent Authorities taking part in the MA process of innovative medicinal products. This example shows the feasibility of such a harmonized approach.

Moreover, our investigation led us to identify interesting LoIs management rules that have not been adopted by EFSA so far. Two examples: (i) adopting an approach more sensitive to the intensity of LoIs. Some agencies adopt an approach distinguishing three-level of intensity [63, 64]—"major" interests, "minor" interests, and "no interest". From this perspective, "minor" LoIs do not preclude participation in the expertise process, but all other participants should be informed of such links. Such a tuned approach could contribute to preventing the pool of available skilled experts from drying up in some cases; (ii) expanding the definition of funding sources of scholars involved as external experts; their declaration of interests could "*include all resources of private origin, regardless of the form and channel, direct or indirect*" [65]. Such a change would address the European Parliament's repeated requests on this matter [66].

Conclusion

Effective LoIs management, meeting the best available practices aiming at preventing conflicts of interest and including a high level of transparency, is key to promoting high-quality unbiased expertise and "*trust in the trustworthy*" among EU citizens. Consequently, regarding the expertise procedures for PPPs' health and environmental risk assessments and marketing authorizations, the EU LoIs management rules should be (i) more homogeneous between the different National Competent Authorities; (ii) better in line with reference good practices, in particular with regard to those adopted by EFSA; (iii) and more transparent, with open access on the Internet to the main documents related to the LoIs management, e.g., analysis criteria, management rules, public declarations of interest, audit reports.

Allowing verification by external independent entities is also likely to promote trust in the independence of the scientific expertise in support of EFSA.

Abbreviations

CoI(s)	Conflict(s) of interest
DoI(s)	Declaration(s) of interests
EE	External expert
EFSA	European Food Safety Agency
EU	European Union
IE	Internal expert
LoI(s)	Link(s) of interest
MA	Marketing authorizations
MO	Management officer
NCA	National Competent Authority
nf	Not found
nc	Not concerned
PPP	Plant protection products

Supplementary Information

The online version contains supplementary material available at https://doi.org/10.1186/s12302-023-00760-1.

Additional file 1. Template of the letters sent by the cnDAspe to the investigated competent authorities, including a short notice on the cnDAspe's remit.

Additional file 2. Selected criteria, filled in for the investigated competent authorities; detailed method used for data collection.

Acknowledgements
The authors would like to thank the French Commission for Deontology and Alerts in Public Health and the Environment (*Commission nationale de la déontologie et des alertes en matière de santé publique et d'environnement*—cnDAspe) for the opportunity to use its data for this article.

Author contributions
GK acquired, analyzed, interpreted the retrieved data regarding LoI management rules, and drafted the article. GP made substantial contributions to the analysis and interpretation of the results, and to the writing of the manuscript. SD made substantial contributions to the interpretation of the results and substantively revised the manuscript. DZN was a major contributor in designing the study, analyzing and interpreting the data, writing the manuscript, and administrating the study. All authors read and approved the final manuscript. The authors of this paper contributed in their personal capacities rather than as representatives of the cnDAspe or other bodies; their views do not necessarily reflect the decisions or the stated policy of their institutions.

Funding
Not applicable.

Availability of data and materials
All data generated or analyzed during this study are included in this published article and its supplementary information files.

Declarations

Ethics approval and consent to participate
Not applicable.

Consent for publication
Not applicable.

Competing interests
The authors declare that they have no competing interests.

Author details
[1]Present Address: Ineris (French National Institute for Industrial Environment and Risks), Verneuil-en-Halatte, France. [2]Sorbonne Paris North University (HSE)/IRIS, Paris, France. [3]CESE (Economic, Social and Environmental Council), Paris, France. [4]Retired Professor of Public Health, Lorraine University, Nancy, France. [5]cnDAspe (French National Commission for Deontology and Alerts in Public Health and Environment [Commission Nationale de la Déontologie et des Alertes en matière de Santé Publique et d'Environnement]), Working Group on the Management of Links of Interest among EU Competent Authorities, Paris, France.

Received: 26 April 2023 Accepted: 1 July 2023
Published online: 08 November 2023

References

1. French Standardization Association (AFNOR) (2003) Norm NFX 50–110. Quality in expertise activities - General requirements of competence for an expertise activity
2. Goldberg RF, Vandenberg LN (2021) The science of spin: targeted strategies to manufacture doubt with detrimental effects on environmental and public health. Environ Health 20(1):1–11
3. Oreskes N, Conway EM (2011) Merchants of doubt: How a handful of scientists obscured the truth on issues from tobacco smoke to global warming. Bloomsbury Publishing USA
4. Michaels D (2008) Doubt is their product: how industry's assault on science threatens your health. Oxford University Press
5. McGarity TO, Wagner WE (2010) Bending Science: How Special Interests Corrupt Public Health Research. Harvard University Press
6. Wislar JS, Flanagin A, Fontanarosa PB, et al. (2011) Honorary and ghost authorship in high impact biomedical journals: a cross sectional survey. Br Med J 343:1
7. Sismondo S (2018) Ghost-managed medicine: Big pharma's invisible hands. Mattering Press
8. Vogel SA (2012) Is it Safe?: BPA and the Struggle to Define the Safety of Chemicals. California: University of California Press
9. Carpenter D, Moss DA (2013) Preventing regulatory capture: Special interest influence and how to limit it. Cambridge University Press
10. Corporate Europe Observatory, Fondation Sciences Citoyennes, GMWatch, et al. (2016) Conflicts of interest at the European Food Safety Authority : enough is enough!
11. Novotny E (2022) Glyphosate, roundup and the failures of regulatory assessment. Toxics 10(6):321
12. Meghani Z, Kuzma J (2011) The "revolving door" between regulatory agencies and industry: a problem that requires reconceptualizing objectivity. J Agric Environ Ethics 24:575–599
13. Frickel S, Moore K (2006) The New Political Sociology of Science: Institutions, Networks, and Power. University of Wisconsin Press
14. Proctor RN, Schiebinger L (2008) Agnotology: The Making and Unmaking of Ignorance. Stanford University Press
15. Frickel S, Gibbon S, Howard J et al (2010) Undone science: charting social movement and civil society challenges to research agenda setting. Sci Technol Human Values 35(4):444–473
16. Hess DJ (2016) Undone science: Social movements, mobilized publics, and industrial transitions. MIT Press
17. Bekelman JE, Li Y, Gross CP (2003) Scope and impact of financial conflicts of interest in biomedical research: a systematic review. JAMA 289(4):454–465
18. Lundh A, Lexchin J, Mintzes B, et al. (2017) Industry sponsorship and research outcome. Cochrane database of systematic reviews
19. Lesser LI, Ebbeling CB, Goozner M et al (2007) Relationship between funding source and conclusion among nutrition-related scientific articles. PLoS Med 4(1):e5
20. Krimsky S (2019) Conflicts of interest in science: How corporate-funded academic research can threaten public health. Simon and Schuster
21. Bero L (2013) Industry sponsorship and research outcome: a Cochrane review. JAMA Intern Med 173(7):580–581
22. Lexchin J, Bero LA, Djulbegovic B et al (2003) Pharmaceutical industry sponsorship and research outcome and quality: systematic review. BMJ 326(7400):1167–1170

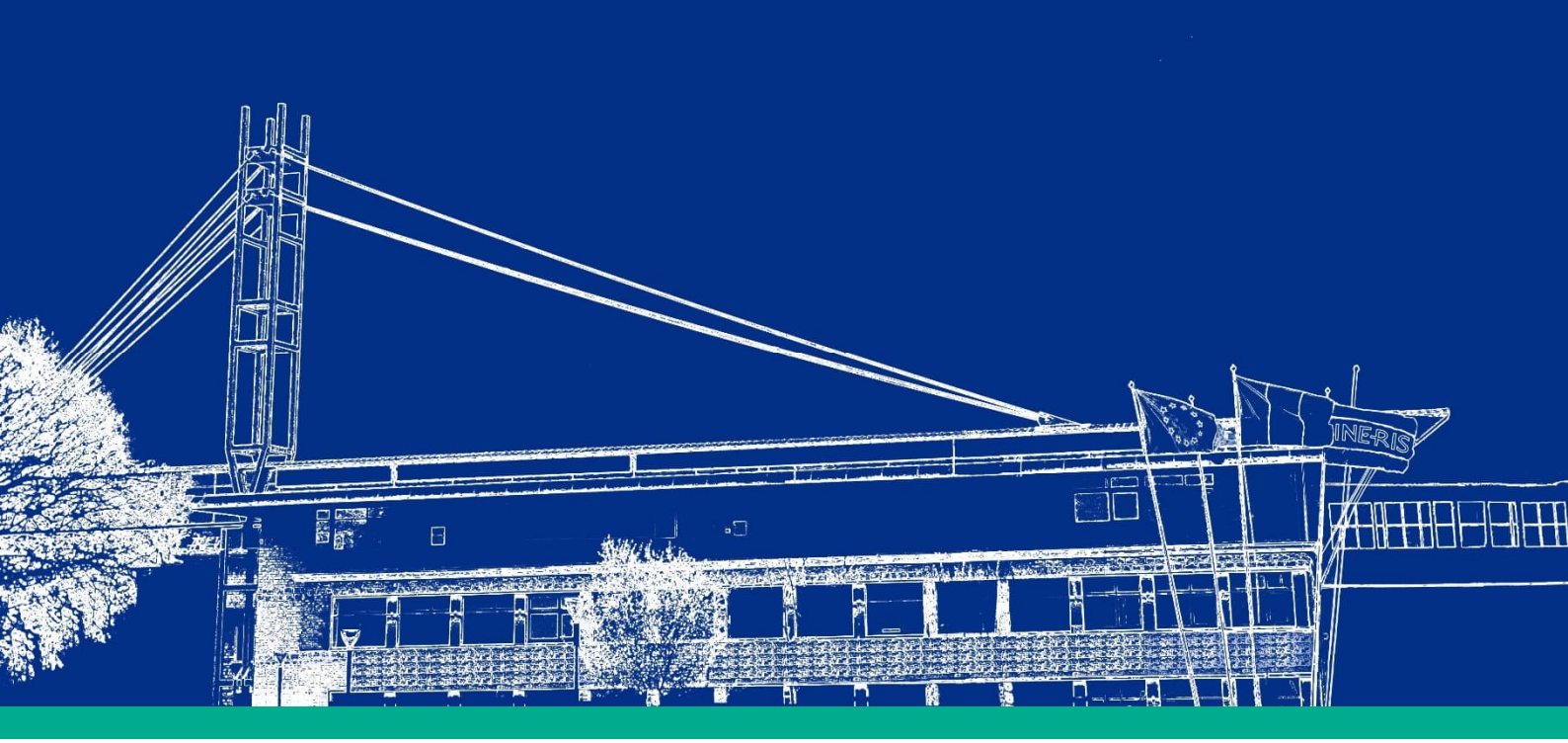
23. Relman AS (1984) Dealing with conflicts of interest. N Engl J Med 310(18):1182–1183
24. Proctor RN (2012) Golden Holocaust: Origins of the Cigarette Catastrophe and the Case for Abolition. University of California Press
25. Barnes DE, Bero LA (1998) Why review articles on the health effects of passive smoking reach different conclusions. JAMA 279(19):1566–1570
26. Bero LA (2005) Tobacco industry manipulation of research. Public Health Rep 120(2):200
27. Markowitz G, Rosner D (2013) Deceit and denial: The deadly politics of industrial pollution. Univ of California Press
28. Elliott KC (2011) Is a little pollution good for you?: incorporating societal values in environmental research. Oxford University Press
29. Harremoës P, Gee D, MacGarvin M, et al. (2013) The precautionary principle in the 20th century: Late lessons from early warnings. European Environment Agency (EEA)
30. Michaels D (2020) The triumph of doubt: dark money and the science of deception. Oxford University Press
31. Babor TF (2009) Alcohol research and the alcoholic beverage industry: issues, concerns and conflicts of interest. Addiction 104:34–47
32. Bes-Rastrollo M, Schulze MB, Ruiz-Canela M et al (2013) Financial conflicts of interest and reporting bias regarding the association between sugar-sweetened beverages and weight gain: a systematic review of systematic reviews. PLoS Med 10(12):e1001578
33. McCulloch J, Tweedale G (2008) Defending the indefensible: the global asbestos industry and its fight for survival. Oxford University Press
34. Committee on the Environment, Public Health and Food Safety (ENVI), Committee on Agriculture and Rural Development (AGRI) (2017) The Monsanto papers and glyphosate. Public hearing - 11 October 2017. European Parliament
35. Foucart S, Horel S (2018) Risks associated with glyphosate weedkiller resurface. Nature 555(7697):443–444
36. Krimsky S, Gillam C (2018) Roundup litigation discovery documents: implications for public health and journal ethics. J Public Health Policy 39:318–326
37. Prete G, Jouzel J-N, Dedieu F. (2021). For science, by science: The emergence and circulation of conflict of interest as a protest repertoire to fight against pesticides *Conflict of Interest and Medicine* (pp. 201–218): Routledge
38. Hauray B, Boullier H, Gaudillière J-P, et al. (2021). Introduction: Conflict of interest and the politics of biomedicine *Conflict of Interest and Medicine* (pp. 1–28): Routledge
39. European Food Safety Authority (EFSA) (2017) EFSA's policy on independence
40. European food Safety Authority (EFSA). Transparency. Retrieved from https://www.efsa.europa.eu/en/about/transparency
41. Executive Director of the European Food Safety Authority (2021) Decision of the Executive Director of the European Food Safety Authority laying down practical arrangements concerning transparency and confidentiality. ver. 2 - 18.01.2021. https://www.efsa.europa.eu/sites/default/files/corporate_publications/files/210111-PAs-transparency-and-confidentiality.pdf
42. European Parliament (2018) European Parliament decision of 18 April 2018 on discharge in respect of the implementation of the budget of the European Food Safety Authority for the financial year 2016 (2017/2159(DEC)). https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-8-2018-0146_EN.html
43. European Parliament (2012) Second report on discharge in respect of the implementation of the budget of the European Food Safety Authority for the financial year 2010. 1.10.2012 - (C7-0286/2011 – 2011/2226(DEC)). https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/A-7-2012-0299_EN.html
44. European Court of Auditors (ECA) (2012) Management of Conflict of Interest in Selected EU Agencies, Special report no 15
45. Robinson C, Holland N, Leloup D et al (2013) Conflicts of interest at the European Food Safety Authority erode public confidence. J Epidemiol Community Health 67(9):717–720
46. Decision of the Executive Director of the European Food Safety Authority on Competing Interest Management. (2018). European Food Safety Authority (EFSA)
47. French National Commission for Ethics and Alerts in Public Health and Environment (cnDAspe) (2023) Comparative analysis of the management of links of interest by the competent authorities for risk assessment and delivery of marketing authorisation of pesticides in the EU Member States. https://www.alerte-sante-environnement-deontologie.fr/IMG/pdf/analyse_comparative_gestion_li_v_janv23.pdf
48. Regulation (EC) No 1107/2009 of the European Parliament and of the Council of 21 October 2009 concerning the placing of plant protection products on the market and repealing Council Directives 79/117/EEC and 91/414/EEC. OJ L 309, 24.11.2009. Annex I, (2009)
49. Consolidated version of the Treaty on the Functioning of the European Union - PART THREE: UNION POLICIES AND INTERNAL ACTIONS - TITLE XIV: PUBLIC HEALTH - Article 168
50. Robinson C, Portier CJ, Čavoški A et al (2020) Achieving a high level of protection from pesticides in Europe: problems with the current risk assessment procedure and solutions. Eur J Risk Regul 11(3):450–480
51. Lexchin J, O'Donovan O (2010) Prohibiting or 'managing' conflict of interest? A review of policies and procedures in three European drug regulation agencies. Soc Sci Med 70(5):643–647
52. Birchall C (2015) 'Data.gov-in-a-box': Delimiting transparency. Eur J Soc Theory 18(2):185–202
53. Jasanoff S (1990) The fifth branch: science advisers as policymakers. Harvard University Press
54. Boudia S, Jas N (2014) Powerless science?: Science and politics in a toxic world. Berghahn Books
55. Grandjean P, Ozonoff D (2013) Transparency and translation of science in a modern world. Environ Health 12(1):70
56. Mie A, Rudén C, Grandjean P (2018) Safety of Safety Evaluation of Pesticides: developmental neurotoxicity of chlorpyrifos and chlorpyrifos-methyl. Environ Health 17(1):77
57. Woodruff TJ, Rayasam SDG, Axelrad DA et al (2023) A science-based agenda for health-protective chemical assessments and decisions: overview and consensus statement. Environ Health 21(1):132
58. Food safety in the EU. Special Eurobarometer Wave EB97.2. (2022). European Union. https://www.efsa.europa.eu/sites/default/files/2022-09/EB97.2-food-safety-in-the-EU_report.pdf
59. Food safety in the EU. Special Eurobarometer – Wave EB91.3. (2019). European Union. https://www.efsa.europa.eu/sites/default/files/corporate_publications/files/Eurobarometer2019_Food-safety-in-the-EU_Full-report.pdf
60. Expert Group "Trust at Risk? Foresight on the Medium-Term Implications for European Research and Innovation Policies (TRUSTFORESIGHT)" (2017) Trust at Risk: Implications for EU Policies and Institutions. European Commission, Directorate-General for Research and Innovation. http://publications.europa.eu/resource/cellar/e512c11b-e922-11e6-ad7c-01aa75ed71a1.0001.01/DOC_1
61. Agacinski D (2018) Expertise and democracy - coping with mistrust. Executive summary. France Stratégie
62. Smith A, Parrino L, Vrbos D et al (2019) Communicating to and engaging with the public in regulatory science. EFSA J 17(S1):e170717
63. European Medicines Agency (EMA) (2022) European Medicines Agency policy on the handling of competing interests of scientific committees' members and experts. https://www.ema.europa.eu/en/about-us/how-we-work/handling-competing-interests
64. Working Group of Quality Managers (WGQM) (2015) Guide to Managing Declarations of Interests. Heads of Medicines Agencies (HMA)
65. French National Commission for Ethics and Alerts in Public Health and Environment (cnDAspe) (2022) Critical Analysis of the EFSA's Rules for Managing Interests. https://www.alerte-sante-environnement-deontologie.fr/IMG/pdf/analyse_efsa_cnda_en.pdf
66. European Parliament resolution of 14 May 2020 with observations forming an integral part of the decision on discharge in respect of the implementation of the budget of the European Food Safety Authority for the financial year 2018 (2019/2078(DEC)), (2020)

Publisher's Note

Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

Le rapport suivant est présenté et analysé à la section 2.E.

Karr G, Bert V. Méthodologie pour encadrer l'usage de renaturation dans la gestion des sites et sols pollués : premier rapport d'étape. Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris), 2025. Ineris-213291- v2.0. https://www.ineris.fr/fr/methodologie-encadrer-usage-renaturation-gestion-sites-sols-pollues-premier-rapport-etape



(ID Modèle = 454913)

Ineris - 213291 - 2772344 - v3.0

03/07/2025

Méthodologie pour encadrer l'usage de renaturation dans la gestion des sites et sols pollués : premier rapport d'étape

INERIS

maîtriser le risque
pour un développement durable

PRÉAMBULE

Le présent document a été réalisé au titre de la mission d'appui aux pouvoirs publics confiée à l'Ineris, en vertu des dispositions de l'article R131-36 du Code de l'environnement.

La responsabilité de l'Ineris ne peut pas être engagée, directement ou indirectement, du fait d'inexactitudes, d'omissions ou d'erreurs ou tous faits équivalents relatifs aux informations utilisées.

L'exactitude de ce document doit être appréciée en fonction des connaissances disponibles et objectives et, le cas échéant, de la réglementation en vigueur à la date d'établissement du document. Par conséquent, l'Ineris ne peut pas être tenu responsable en raison de l'évolution de ces éléments postérieurement à cette date. La mission ne comporte aucune obligation pour l'Ineris d'actualiser ce document après cette date.

Au vu de ses missions qui lui incombent, l'Ineris, n'est pas décideur. Les avis, recommandations, préconisations ou équivalent qui seraient proposés par l'Ineris dans le cadre des missions qui lui sont confiées, ont uniquement pour objectif de conseiller le décideur dans sa prise de décision. Par conséquent, la responsabilité de l'Ineris ne peut pas se substituer à celle du décideur qui est donc notamment seul responsable des interprétations qu'il pourrait réaliser sur la base de ce document. Tout destinataire du document utilisera les résultats qui y sont inclus intégralement ou sinon de manière objective. L'utilisation du document sous forme d'extraits ou de notes de synthèse s'effectuera également sous la seule et entière responsabilité de ce destinataire. Il en est de même pour toute autre modification qui y serait apportée. L'Ineris dégage également toute responsabilité pour chaque utilisation du document en dehors de l'objet de la mission.

Nom de la Direction en charge du rapport : DIRECTION SITES ET TERRITOIRES

Rédaction : KARR Guillaume – BERT Valérie

Vérification :

Approbation : Document approuvé le 03/07/2025 par DUPLANTIER STEPHANE

Liste des personnes ayant participé à l'étude : Nathalie Velly

L'Ineris remercie toutes les personnes interviewées pour avoir pris le temps de l'échange et pour avoir partagé leurs avis et retours d'expériences, et Guillaume Gay du ministère de l'Environnement (B3S) pour les échanges.

Table des matières

1 Introduction : contexte et objectifs....6
2 Étude des pratiques existantes....6
2.1 Réalisation d'entretiens....6
2.2 Analyse des entretiens réalisés....9
2.3 Principales conclusions issues des entretiens réalisés....21
3 Définition de termes clés....23
3.1 Renaturation : définitions législative et réglementaire....23
3.2 Sol....23
3.3 Désartificialisation....25
3.4 Restauration....26
3.5 Amélioration de la fonctionnalité des sols....28
3.6 Désimperméabilisation....33
3.7 Habitats pour les écosystèmes....34
3.8 Renaturation....37
4 Démarche méthodologique : premières propositions....44
4.1 Déroulé des principales étapes de la méthode....46
4.2 Milieu écologique type (MET)....53
4.3 Environnement local de référence (ELR)....54
4.4 Indicateurs de suivi....55
4.5 Interventions....57
4.6 Interactions avec les populations riveraines....59
4.7 Usage de renaturation et Plan de gestion....64
5 Typologie d'aménagements pour l'usage de renaturation....68
6 Développer l'usage de renaturation en France....72
6.1 Arguments en faveur du choix de l'usage de renaturation....72
6.2 Pistes pour rendre l'usage de renaturation plus attractif....77
7 Aspects à développer par la suite - quelques propositions....79
8 Conclusion....81
9 Acronymes....82
10 Références....84
11 Annexes....97

Résumé

À la suite de la parution du décret n°2022-1588 relatif à la définition des types d'usages dans la gestion des sites et sols pollués, et dans le cadre de ses missions d'appui technique auprès du ministère chargé de l'Écologie, l'Ineris a publié un guide[1] visant à préciser les caractéristiques des différents types d'usages retenus par la réglementation. Concernant l'usage de renaturation, ce guide précise qu'« *un document spécifique fournissant des outils pour atteindre un niveau de réhabilitation compatible avec cet usage est nécessaire* ». Le présent rapport constitue ce document spécifique.

Afin d'accompagner la mise en œuvre de l'usage de renaturation dans la gestion des sites et sols pollués, ce rapport présente :

- une collecte et une analyse de retours d'expériences, issus de projets de terrain en lien avec la renaturation, en cours ou achevés, réalisés en France et hors contexte de recherche.
  Ces retours d'expériences ont été collectés sous la forme d'interviews de chefs de projets issus de différents types d'organismes. Par exemple : bureaux d'études spécialisés dans la gestion des sites et sols pollués, dans le paysage, dans l'aménagement des territoires, etc.
- une étude bibliographique visant à préciser la définition réglementaire de l'usage de renaturation ;
- une proposition de démarche méthodologique pour mener à bien un usage de renaturation.
  Cette démarche a été élaborée à partir de l'analyse des retours d'expériences collectés et des travaux de définition réalisés, ainsi que sur la base des résultats disponibles dans la littérature scientifique et technique.
  Cette démarche inclut trois étapes clés :
  1) choisir le milieu écologique type (MET) visé, selon une liste de référence telle que la typologie EUNIS (*European Nature Information System*), correspondant à un gain écologique pour le site considéré, en cohérence avec son contexte pédo-bioclimatique, et en tenant compte des besoins des différentes parties prenantes impliquées (gestionnaire du site, riverains, élus locaux, etc.) ;
  2) sélectionner des indicateurs de suivi, au regard des principales caractéristiques d'intérêt du MET visé et de manière proportionnée aux enjeux ;
  3) identifier, dans les cas où c'est possible, un environnement local de référence (ELR), c'est-à-dire une déclinaison locale du MET visé, puis y mesurer les indicateurs de suivi sélectionnés : les résultats obtenus peuvent alors constituer l'objectif de la renaturation à long terme.

  L'usage de renaturation est considéré comme réussi lorsque le site atteint un état résilient et se trouvant sur une trajectoire menant à l'ELR.
  En complément, dans le cas particulier où des écosystèmes d'intérêt seraient initialement présents sur le site, l'usage de renaturation peut être constitué d'actions de conservation et de suivi.

Cette démarche constitue une approche générale qui peut s'adapter à tous types de sites, de contextes et d'objectifs spécifiques, permettant de mettre en cohérence les projets de renaturation et de les inscrire dans la logique du plan de gestion[2].

En complément, le présent rapport traite des différents types d'interactions possibles avec les populations riveraines, et notamment de l'opportunité de permettre un accès aux sites où un usage de renaturation a été retenu.

---

[1] Ineris. Guide sur les types d'usages définis dans le cadre des cessations d'activité des installations classées pour la protection de l'environnement et de projets d'aménagement. 2023. Réf. Ineris - 213282 - 2759342 - v3.0. https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/Rapport-Ineris-213282-279342-Typologie%20d%27usage%20SSP%20v3.pdf

[2] Direction générale de la Prévention des Risques (DGPR) - Bureau du Sol et du Sous-Sol. Méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués. Ministère chargé de l'Écologie, 2017. https://www.ecologie.gouv.fr/sites-et-sols-pollues#scroll-nav__2

Abstract

Following the publication of Decree no. 2022-1588 on the definition of types of usage in the management of polluted sites and soils, and as part of its technical support mission for the French Ministry of Ecology, Ineris published a guide aimed at specifying the characteristics of the various types of usage retained. With regard to the “renaturation usage” (i.e., ecological restoration usage), this guide indicates that “*a specific document providing tools to achieve a level of rehabilitation compatible with this usage is required*”. The present report constitutes this specific document.

In order to guide the implementation of renaturation operations in the management of polluted sites and soils, this report presents:

- a phase of collecting and analyzing feedback from current and completed projects, both in France and outside the research context.

  This feedback took the form of interviews with project managers from various types of organizations. For example: consultancies specializing in the management of polluted sites and soils, landscaping, regional planning, etc.

- a bibliographical study aimed at detailing the content of the regulatory definition of renaturation.
- a proposed methodological approach to carrying out a renaturation project.

  This approach has been developed on the basis of the realized analysis of experience feedback and definition work, as well as on the results available in the scientific and technical literature.
  The approach includes three key stages:

  1) Choosing the targeted Standard Ecological Habitat (SEH), among a reference list such as the European Nature Information System (EUNIS) typology, corresponding to an ecological gain for the site considered, consistent with its soil-bioclimatic context, and taking into account the needs of the different stakeholders involved (site manager, local residents, elected representatives, etc.).
  2) Selecting monitoring indicators, based on the SEH's characteristics of interest and in proportion to the issues at stake.
  3) Wherever possible, identifying a Local Reference Habitat (LRH), i.e., a local variation of the targeted SEH, and then carry out measurements corresponding to the selected monitoring indicators: the results obtained could constitute the long-term renaturation objective.

  Renaturation usage is considered successful when the site reaches a self-sustaining, resilient state and is on a trajectory leading to the LRH.
  Moreover, in the particular case where ecosystems of interest were initially present on the site, renaturation may just consist of conservation and monitoring actions.

This is a general approach that can be adapted to all types of sites, contexts and specific objectives, enabling renaturation projects to be coherent and consistent with the Management Plan.
In addition, this report deals with the various types of possible interactions with the local population, and in particular with the opportunity of allowing access to the sites where a renaturation use has been selected.

Pour citer ce document, utilisez le lien ci-après :

Institut national de l’environnement industriel et des risques, Méthodologie pour encadrer l'usage de renaturation dans la gestion des sites et sols pollués : premier rapport d'étape, Verneuil-en-Halatte : G Karr, V Bert, Ineris - 213291 - v3.003/07/2025.

Mots-clés :

Usage de renaturation ; gestion des sites et sols pollués ; restauration écologique ; désartificialisation ; refonctionnalisation

4 Démarche méthodologique : premières propositions

Cette section présente de premiers éléments de méthode pour guider l'usage de renaturation dans le cadre de la gestion des sites et sols pollués.

S'inscrivant dans la démarche du plan de gestion (section 4.7), le déroulé des principales étapes de la méthode est décrit dans la section 4.1 et synthétisé dans le logigramme de la Figure 8. Pour certaines étapes et notions clés (par exemple : milieu écologique type (MET), environnement local de référence (ELR), indicateurs de suivi), des approfondissements sont présentés dans les sections 4.2 à 4.6.

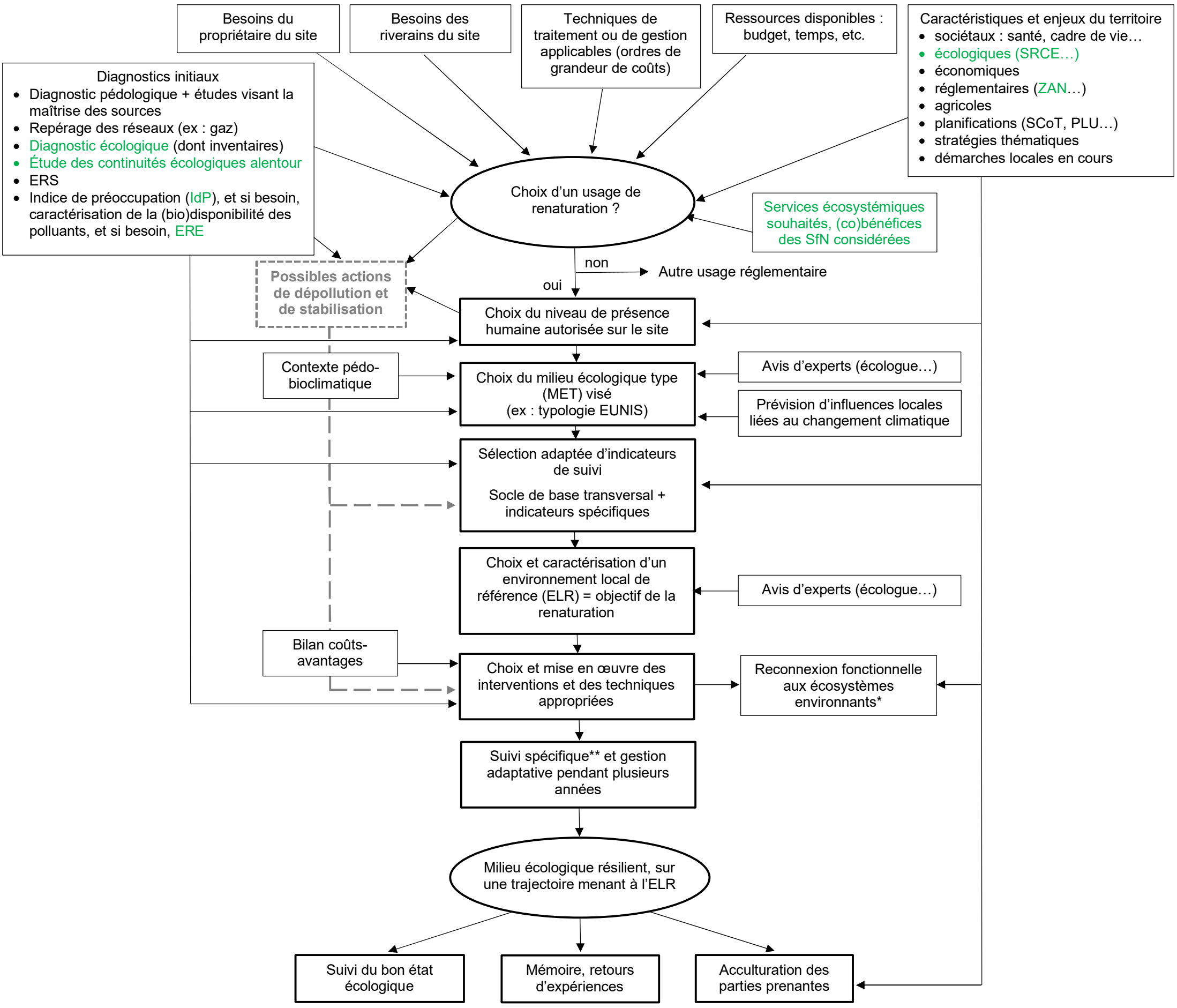


Figure 8 : Usage de renaturation : proposition de démarche méthodologique - logigramme

** On vise ainsi une refonctionnalisation à l'échelle du site et à l'échelle du territoire.*

*** proportionné aux enjeux en présence (ex : rareté à l'échelle du territoire de certains milieux écologiques associés à l'ELR [68]) ; spécifique aux techniques retenues, ainsi qu'aux caractéristiques du site et de l'ELR.*

En vert : critères liés à l'usage de renaturation

4.1 Déroulé des principales étapes de la méthode

Choix multicritère d'un usage de renaturation

Retenir l'usage de renaturation pour un site pollué est un choix multicritère. Comme pour les autres usages [2], ces critères peuvent inclure les besoins du propriétaire du site, les ressources disponibles, les résultats de divers types de diagnostics [86] (ex : investigations sur les sols, les eaux souterraines et les gaz du sol ; études documentaires sur l'historique du site), les enjeux du territoire (notamment traduits dans les documents d'urbanisme applicables) [87], les résultats d'évaluations de risques prédictives (ex : analyses des risques résiduels (ARR) prédictives associées aux usages considérés), etc.

En complément, le choix d'un usage de renaturation repose aussi sur des critères spécifiques. Par exemple : inventaires faunistiques et floristiques, caractérisation des risques pour les écosystèmes (indice de préoccupation (IdP) [43, 88] ; évaluation des risques pour les écosystèmes (ERE) [89], par exemple sous la forme d'une approche TRIADE [9, 10]), services écosystémiques souhaités [90], proximité avec des parties de trames verte et brune (voire de trames blanche et noire) [91], notamment dans le cadre du schéma régional de cohérence écologique (SRCE).

Ce choix multicritère peut conduire à différents contextes et différents choix pour l'usage de renaturation, correspondant à différents objectifs et à différents types de milieux écologiques. Voici quelques premiers exemples, à titre d'illustrations :

- une friche clôturée et laissée en libre évolution, présentant des pollutions non concentrées mais incompatibles avec une fréquentation du lieu par des populations (ex : présence de métaux lourds en surface…), dans un contexte où la dispersion des polluants est faible (pas d'envol de poussières ou de lixiviation vers les eaux), où des bioindicateurs ne montrent pas d'effet et où des écosystèmes d'intérêts fonctionnels ont été recensés [92-95] ;
- une friche clôturée et laissée en libre évolution, présentant un IdP faible mais où des pollutions non concentrées mais trop élevées empêchent la fréquentation humaine ;
- un site laissé en libre évolution et dont la fréquentation humaine est possible, avec un chemin de promenade balisé et constitué de matériaux non pollués visant à éviter le contact avec le sol ;
- un espace vert urbain, incluant des zones délimitées laissées en libre évolution, après reconstruction d'un sol fonctionnel sur la base de réemploi de matériaux inertes issus du site historique ;
- un site présentant un traitement par phytoextraction et/ou phytostabilisation, visant des concentrations en polluants dans le sol compatibles avec la vie d'espèces locales d'intérêt.

La section 5 présente de manière plus approfondie des contextes et des types d'aménagements permettant d'illustrer l'usage de renaturation.

Les ICPE se trouvant souvent dans une zone urbaine ou péri-urbaine, cet extrait du Plan Nature en ville [96] décrit des enjeux qui s'inscrivent dans le champ du présent rapport[8] : « *Les espaces de nature constituent […] un bien commun de la structure urbaine et leur absence est un facteur d'aggravation des vulnérabilités socio-urbaines, identifié notamment dans les territoires prioritaires de la politique de la ville, souvent peu végétalisés. Il répond à un besoin sociétal plébiscité : 92% des Français estiment qu'il n'y a pas assez de « nature en ville », 63% qu'il est prioritaire d'accorder plus de place aux espaces de nature et à la végétalisation dans le quartier dans lequel ils vivent - 79% pour les [quartiers prioritaires de la politique de la ville]).*

La protection du vivant par le maintien, la préservation, la restauration et le développement des fonctions écologiques en milieu urbain est une nécessité en soi. Ce renforcement des écosystèmes et de leurs fonctionnalités écologiques est aussi directement une condition pour l'habitabilité des villes. Il est essentiel de repenser désormais l'aménagement de la ville en relation avec le vivant, dans un processus de nouvelles coopérations entre ville et nature, dans une logique de co-bénéfices écosystémiques ».

[8] Le Plan Nature en ville définit le terme « ville » comme « territoire urbain et périurbain » [96].

En pratique, ce choix multicritère peut être réalisé en s'appuyant sur différentes méthodes d'aide à la décision, allant d'un simple échange entre décideurs jusqu'à des méthodes plus complexes, telles que des méthodes d'analyses multicritères (ex : surclassement de synthèse avec l'outil ELECTRE [97]) intégrant des phases de révélations de préférence auprès de différents types de parties prenantes [98]. Ici aussi, la méthode retenue sera proportionnée aux enjeux en présence, et les raisons du choix retenu seront explicitées.

Les raisons pouvant inciter au choix d'un usage de renaturation seront approfondies à la section 5.

Dans tous les cas, le choix de cet usage est une proposition faite par le gestionnaire du site aux autorités locales compétentes.

Choix du niveau de présence humaine autorisée sur le site

La définition législative et réglementaire de l'usage de renaturation (section 3.1) est centrée sur des enjeux environnementaux, mais elle n'exclut en rien la présence humaine[9].

Dans la même logique, il est possible de randonner dans des zones couvertes par des arrêtés de protection des habitats naturels (APHN), par des arrêtés de protection de biotope (APB) et même au sein de réserves biologiques intégrales (RBI) [99].

Une fois que l'usage de renaturation a été choisi, se pose donc alors la question du niveau de présence humaine qui sera autorisée sur le site.

Ici aussi, il s'agit d'un choix multicritère, tenant compte notamment des besoins des populations riveraines, des niveaux de pollutions présents dans les sols, des priorités sociétales du territoire, etc.

Typiquement, trois niveaux de présence peuvent être envisagés :

- une interdiction d'accéder au site. Par exemple : une friche présentant des zones de pollutions non concentrées mais incompatibles avec une exposition des êtres humains.
  D'après la méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués, « *la priorité consiste d'abord à déterminer les modalités de suppression des pollutions concentrées, plutôt que d'engager des études pour justifier leur maintien en l'état* » [100] ; une telle interdiction sera donc le plus souvent temporaire ;
- une interdiction d'accéder à certaines parties du site uniquement. Par exemple : un site présentant des pollutions résiduelles élevées (incompatible avec la fréquentation humaine) et circonscrites à des zones limitées ; ou encore un site présentant une pollution résiduelle (diffuse) significative, mais visitable par un chemin balisé et constitué de matériaux non pollués et visant à éviter le contact avec le sol ;
- un libre accès au site, potentiellement accompagné de restrictions pour certaines activités susceptibles de dégrader les écosystèmes. Par exemple : espace vert urbain à forte naturalité où sont interdites les utilisations de produits pesticides (ex : fongicides, insecticides).

Plusieurs raisons plaident pour permettre un accès du public au site dans le cadre d'un usage de renaturation. Notamment :

- la possibilité d'une réappropriation du site par les habitants peut être une motivation forte des élus pour choisir un usage de renaturation ;

[9] Pour mémoire : la renaturation d'un sol « *consiste en des actions ou des opérations de restauration ou d'amélioration de la fonctionnalité d'un sol, ayant pour effet de transformer un sol artificialisé en un sol non artificialisé* », cet usage « *impliquant une désartificialisation ou des opérations de restauration ou d'amélioration de la fonctionnalité des sols, notamment des opérations de désimperméabilisation, à des fins de développement d'habitats pour les écosystèmes* » (section 3.1).

- les conclusions de nombreuses études suggèrent que le contact avec la nature est associé à des bénéfices pour la santé [101, 102] ;
- l'accès au site devrait augmenter le niveau d'acceptabilité du projet auprès des populations riveraines.

Ces aspects sont développés dans la section 4.6.

Choix du milieu écologique type (MET) visé

À la suite du travail réalisé à la section 2, la renaturation désigne ici le processus qui vise à aider un sol artificialisé à se rapprocher d'un état naturel, c'est-à-dire à retrouver une composition (vivante et non vivante) et des fonctions correspondant à un milieu écologique donné.

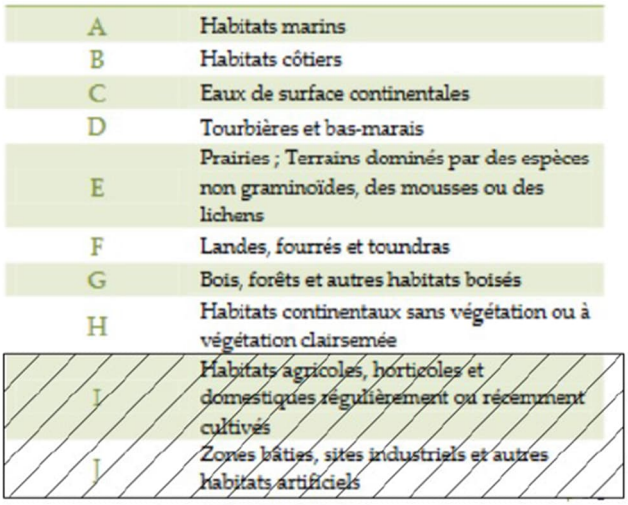
En particulier, ce milieu n'est pas nécessairement un état antérieur du site considéré : la renaturation est un retour à une nature sur le site mais pas forcément vers le type de nature qui s'y trouvait historiquement. Ceci s'applique de fait lorsque l'état écologique historique du site est peu connu ou inconnu, comme souvent dans les cas de sites industriels en zone périurbaine ou urbaine [19, 32, 103].

Certains milieux peuvent présenter un intérêt au regard d'un projet de construction locale d'une trame écologique ; ou encore, le choix d'un milieu peut s'inscrire dans une démarche visant à inverser ou à limiter une dynamique de disparition de certains milieux d'intérêt sur le territoire où se trouve le site.

Le milieu écologique visé peut être choisi parmi une liste de milieux écologiques types (MET), en cohérence avec le contexte pédo-bioclimatique du site [91], les résultats du diagnostic pédologique initial (ex : indicateurs agro-pédologiques classiques) et selon des critères autres qu'écologiques (ex : socio-économiques, politiques, culturels).

Pour le choix du MET, l'avis d'un expert écologue est particulièrement utile, notamment sur les aspects ne concernant pas la pollution des sols et en lien avec la création d'écosystèmes et leurs interactions. Certaines caractéristiques topographiques pourraient être un critère d'intérêt dans le choix du MET du projet.

Sur la base des retours d'expériences présentés à la section 2, de précédents travaux [104], dont des travaux du ministère chargé de l'Écologie [68], et aussi en cohérence avec les réflexions en cours portant l'évolution de la méthode d'interprétation de l'état des milieux (« IEM + ») [105], il est proposé de choisir le MET visé parmi les unités de A à H (milieux les moins artificialisés) de la typologie EUNIS [106-109].



A	Habitats marins
B	Habitats côtiers
C	Eaux de surface continentales
D	Tourbières et bas-marais
E	Prairies ; Terrains dominés par des espèces non graminoïdes, des mousses ou des lichens
F	Landes, fourrés et toundras
G	Bois, forêts et autres habitats boisés
H	Habitats continentaux sans végétation ou à végétation clairsemée
I	Habitats agricoles, horticoles et domestiques régulièrement ou récemment cultivés
J	Zones bâties, sites industriels et autres habitats artificiels

Figure 9 : Typologie EUNIS : unités retenues (de A à H : les moins artificialisées) [68]

Dans le cas d'un site d'une grande superficie, il est possible que plusieurs types de sol soient présents, et il est donc possible de choisir un MET par zone de sol homogène.

En cohérence avec la définition centrée sur les enjeux environnementaux proposée par le décret n°2022-1588 pour l'usage de renaturation, ce choix du MET visé caractérise la logique de la méthode. L'objectif premier n'est pas de développer certains services écosystémiques : l'objectif premier est de retrouver un milieu écologique résilient, qui par surcroît fournira des services écosystémiques.

De plus, dans le cas particulier où des écosystèmes d'intérêt seraient initialement présents sur le site, l'usage de renaturation peut se limiter à des actions de conservation et de suivi.

Les aspects liés au MET visé sont développés plus avant dans la section 4.2.

Sélection adaptée d'indicateurs de suivi

Sur la base des principales caractéristiques d'intérêt du MET visé, un ensemble d'indicateurs est sélectionné selon le principe de spécificité, dans l'objectif de pouvoir suivre l'évolution du site à renaturer [91].

Cette sélection tient compte également du principe de proportionnalité. Notamment, le nombre d'indicateurs retenus, leur complexité et leurs coûts sont proportionnés aux enjeux en présence.

Enfin, dans l'objectif d'harmoniser les pratiques, un socle de base transversal pourrait être rendu obligatoire pour tous les projets de renaturation. Le cas échéant, pour un projet donné, ce socle de base serait complété par des indicateurs plus spécifiques au MET visé.

Une opération de renaturation étant complexe [28, 103], et sa mise en œuvre pouvant donc être parfois assez exploratoire, ces indicateurs de suivi sont essentiels pour mettre en place un apprentissage itératif, qui permet une gestion adaptative tout au long de la durée du projet [104, 110].

Une fois les indicateurs de suivi sélectionnés, l'étape suivante consiste à réaliser les mesures correspondantes sur le site avant le début des interventions, afin d'obtenir l'état initial du projet de renaturation.

De plus, dans le cas particulier où des écosystèmes d'intérêt seraient initialement présents sur le site et où des actions de conservation seraient décidées, les actions de suivi se baseront sur des indicateurs caractéristiques de ces écosystèmes d'intérêt.

Le sujet du choix des indicateurs de suivi est approfondi à la section 4.4.

Choix et caractérisation d'un environnement local de référence (ELR)

Sur la base du MET visé, un environnement correspondant est recherché dans les environs du site. Dans le cas où cet environnement a pu être trouvé, des mesures y sont faites pour renseigner les indicateurs de suivi retenus. La synthèse des valeurs obtenues constituent l'objectif de la renaturation, la référence vers laquelle le projet visera à faire évoluer les caractéristiques du site [76, 111].

Pour faire écho avec la notion d'environnement local témoin (ELT) - qui vise à caractériser l'état dans lequel se trouverait le site sans sa dégradation spécifique - l'environnement proche où sont faites les mesures est appelé environnement local de référence (ELR).

En utilisant le vocabulaire de la méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués, les caractéristiques de l'ELR constituent « *les objectifs de réhabilitation [,] définis en fonction de l'usage futur déterminé pour le site* » [112].

Les aspects liés à l'ELR sont développés plus avant dans la section 4.3.

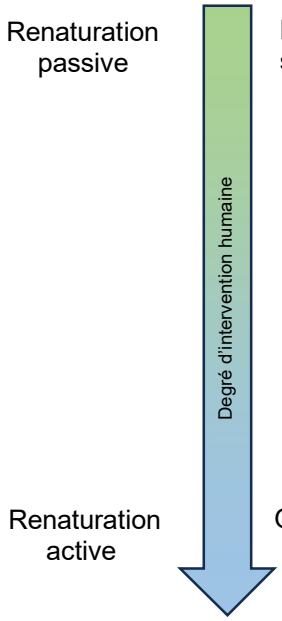
Choix et mise en œuvre des interventions et des techniques appropriées

Compte tenu de la comparaison entre l'ELR et l'état initial du site, différents types d'interventions et de techniques sont identifiées, afin de pouvoir mettre en œuvre des processus qui permettront d'atteindre les résultats attendus.

Sur la base des informations disponibles à ce stade, plus complètes et plus précises qu'au moment initial du choix du futur usage du site, un bilan coûts-avantages est réalisé pour pouvoir effectuer une analyse comparative des différentes solutions considérées. Ce bilan est inclus dans la logique du Plan de Gestion réalisé dans le cadre de la méthodologie de gestion des sites et sols pollués [16].

L'efficacité de ces interventions et de ces techniques est contrôlée avec les indicateurs de suivi retenus. Elle est évaluée au regard de l'ELR.

En complément de la réduction et de la maîtrise des sources de pollution, différents degrés d'intervention sont possibles [103, 113] pour faire évoluer le site vers l'ELR choisi, allant de la quasi-absence d'action jusqu'aux projets d'ingénieries pédologique, civile et écologique (Figure 10). Par exemple :



- Interdire l'accès au site (libre évolution conduisant à un état de féralité[10] [92], réensauvagement[11] [78, 114, 115])
- Retirer certains revêtements, désimperméabiliser[19]
- Retirer certaines constructions : bâtiments, infrastructures bétonnées)
- Décompacter
- Créer un anthroposol (« technosol »), potentiellement à partir de matériaux issus du site ou de milieux urbains de proximité [116-118] ; ou amender le sol du site pour le rendre apte à accueillir des vivants (ex : apporter de la terre externe au site, compost amendement granulométrique (sableux))
- Biodynamiser : inoculation directe ou ajouts de matières riches en microorganismes. Ex : BRF, compost, algues.
- Introduire des espèces ingénieures de l'écosystème - Ex : vers de terre, champignons mycorhiziens, fourmis moissonneuses – et des espèces clés de voûte[12]
- Excaver (ex : pollutions concentrées)

NB : les termes « passive », « active » et « spontanée »[13] sont ceux utilisés par l'ARB ÎdF [28] et retrouvés dans la littérature scientifique consultée dans le cadre du présent rapport. On peut également trouver le terme « régénération naturelle » pour désigner la renaturation passive [119].

---

[10] État de retour d'une espèce ou d'une site vers un état sauvage.

[11] « *(ou rewilding en anglais), qui correspond à la recolonisation d'un milieu par des espèces sauvages (aidée ou non par une intervention humaine), à la suite de l'abandon ou de l'arrêt des activités anthropiques* » (ARB ÎdF [28]).
Le réensauvagement est ici considéré comme un type d'options possibles dans le continuum des actions possibles de renaturation [78].

[12] Espèce dont l'impact sur la communauté ou l'écosystème est disproportionné par rapport à son abondance (IPBES [36])

[13] L'arrêt des perturbations humaines peut suffire à permettre le développement de la flore et de la faune présente sur le site.

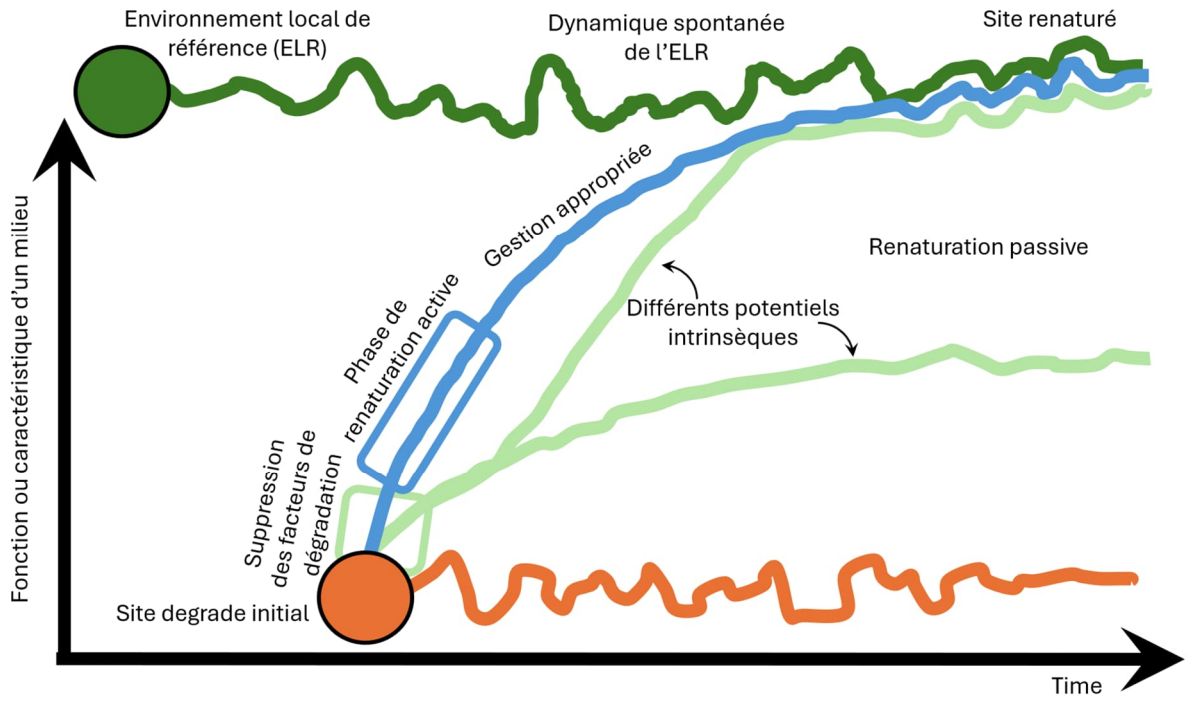


Figure 10 : Illustration de l'articulation entre renaturations active et passive (modifié à partir de Jaunatre et al. 2012 [120] et Gallet 2024 [119])[14]

Le sujet du choix des interventions et des techniques est approfondi à la section 4.5.

Suivi de la dynamique générée

Atteindre les caractéristiques de l'ELR peut prendre plusieurs dizaines d'années, voire quelques centaines d'années [80, 92, 115]. Ainsi, dans le contexte des évaluations environnementales des plans et projets, donc en amont de potentielles pollutions de sol, l'Autorité environnementale souligne que « *les sols constituent des habitats vivants dont la reconstitution après artificialisation peut s'étaler sur plusieurs siècles* » [121].

Ces délais ne correspondant pas aux délais les plus courants pour des projets d'aménagement, l'usage de renaturation peut être considéré comme réussi lorsque le site aura atteint un état résilient[15] et se trouvant sur une trajectoire menant à l'ELR [76, 80, 103, 120]. Ou plus précisément, l'usage de renaturation se réduira à une surveillance proportionnée, accompagnée d'un entretien de base permettant de maintenir l'ELR choisi[16].

Un suivi sur le long terme, avec souvent une fréquence plus faible et sur un nombre réduit d'indicateurs clés, permettra de s'assurer du maintien sur la trajectoire visée.

[14] Par exemple, cette caractéristique pourrait être l'abondance en une espèce d'intérêt ; les fluctuations des courbes peuvent correspondre à des variations saisonnières, à des aléas climatiques, à l'influence d'activités à proximité du site, etc.
[15] La renaturation « *devrait permettre des perturbations naturelles dans une gamme de variabilité pertinente du point de vue évolutionniste* » [76].
[16] Car les zones de nature évoluent vers des forêts, sauf en cas de fortes contraintes géographiques (ex : altitude).

Concernant la conservation de la mémoire de potentielles pollutions résiduelles[17] [122], le guide de l'Ineris sur les usages [2] rappelle que, deux outils peuvent être utilisés dans le cadre de la gestion des sites et sols pollués :

- les restrictions d'usages, pour lesquelles deux outils en particulier sont à privilégier : les servitudes d'utilité publique (SUP) et les restrictions d'usage entre parties (RUP) ;

- les secteurs d'information sur les sols (SIS).

Les porters à connaissance ne produisent d'effets qu'au travers de leur prise en compte dans les documents d'urbanisme. Ils ne sont pas opposables en l'état, et leur utilisation doit donc être privilégiée dans des contextes où l'information doit être communiquée rapidement sans attendre la signature d'un arrêté préfecture instaurant une SUP ou un SIS.

Pour conserver la mémoire des sites et sols pollués, les secteurs d'information sur les sols sont à privilégier dans le cas où l'usage du site est compatible avec la pollution résiduelle. En revanche, l'application de restrictions d'usage s'avère pertinente lorsque, pour l'usage d'un site, il est nécessaire d'interdire ou de restreindre l'utilisation de certains milieux.

En particulier, l'objectif est d'assurer que de potentiels aménagements futurs ne réduisent pas le niveau de maitrise des expositions.

4.2 Milieu écologique type (MET)

Typologie EUNIS

D'après l'Office français de la biodiversité (OFB), la typologie *European Nature Information System* (EUNIS) est « *une classification des habitats naturels, semi-naturels et anthropiques des secteurs terrestres et marins d'Europe. Cette typologie est utilisable sur tout le territoire français métropolitain et sur tous types de milieux* » [123].

Plusieurs « niveaux » correspondent à différents degrés de détail dans la description des habitats. D'après l'OFB, « *les critères pour identifier un habitat ne requièrent pas de connaissances confirmées en botanique ou en phytosociologie. Le niveau 3 de la classification Eunis peut permettre d'identifier des habitats sans relevé floristique, donc toute l'année. Néanmoins, dans le cadre d'une démarche conservatoire (évaluation, suivi, action fine de gestion), il peut être pertinent d'aller au-delà (par ex. niveaux 4 ou 5)* ».

En cohérence avec les réflexions actuelles sur l'IEM+ [105] et avec des travaux précédents du ministère chargé de l'Écologie [68], le niveau 3 (ex : G.1.3, forêts riveraines méditerranéennes) est le minimum attendu, et le niveau 4 est le niveau préférentiel pour un projet de renaturation, afin d'obtenir des caractéristiques suffisamment détaillées [103, 104], le choix relevant notamment des moyens disponibles pour le projet et du principe de proportionnalité.

Dans le cas où les informations disponibles ne permettraient pas d'identifier un MET adapté au contexte pédo-bioclimatique du site [103], ou dans le cas de sols s'éloignant très fortement de sols pouvant être retrouvés dans des zones naturelles (ex : anthroposol avec un pH > 10 dans certaines couches et avec une forte hétérogénéité de matériaux) la démarche de renaturation pourra consister à rétablir le meilleur niveau possible pour le plus grand nombre de fonctions possibles[18], et en particulier pour les fonctions principales du sol, sur la base de recherches bibliographiques et de dires d'experts. Avec le vocabulaire décrit à la section 2, cette démarche vise à retrouver un sol aussi multifonctionnel que possible.

[17] cf. Guide sur la conservation de la mémoire et les restrictions d'usage en contexte de sites et sols pollués, pour approfondir ces aspects [122].
[18] Cf. notamment interview de Quentin Vincent (Annexe 1).

Milieu écologique historique

Un milieu écologique historique du site « avant dégradation » peut être choisi comme MET, lorsque les informations disponibles sur ce milieu sont suffisantes. C'est notamment l'option privilégiée dans le cadre de la séquence ERC [40, 124]. Elle peut être assez pratique lorsque les dégradations en présence sont faibles [103].

En parallèle, des informations suffisantes sur un état historique du site n'oblige pas à choisir cet état comme MET du projet : un autre MET adapté au contexte et aux objectifs du site peut être retenu.

En particulier, il est possible que les contraintes extérieures au site aient changé depuis la période de l'état historique considéré, et que de ce fait il soit devenu impossible de revenir à cet état historique [77, 103]. En d'autres termes, même en l'absence de dégradation, cet état historique aurait évolué vers un autre état.

Dans tous les cas, les informations disponibles sur les états historiques du site peuvent apporter des éclairages intéressants au moment du choix d'un MET pour le projet de renaturation [78].

Adaptation au changement climatique

Parmi les nouvelles contraintes qui s'appliquent au site, le changement climatique peut avoir exercé et pourra encore exercer une influence locale significative, au moment du démarrage du projet ou plus tard pendant son déroulé. Le choix d'un MET doit donc intégrer les informations disponibles sur cette influence existante ou attendue [76]. Il s'agit notamment de celles fournies par les projections climatiques de référence, issues de « *simulations climatiques régionalisées, réalisées dans les principaux laboratoires français de modélisation du climat* » [125].

En parallèle, et autant que possible, l'usage de renaturation doit constituer un des outils contribuant à réduire l'impact du changement climatique. Un projet de renaturation peut être considéré comme s'inscrivant dans le cadre des solutions fondées sur la nature [76, 126], avec notamment un potentiel de capture du carbone atmosphérique et un potentiel d'atténuation des effets néfastes (ex : réduction des îlots de chaleur, diminution du risque d'inondation).

4.3 Environnement local de référence (ELR)

Une fois un MET choisi, associé à des référentiels génériques caractérisant ses principales composantes, trouver une déclinaison locale permet de faire des mesures pour obtenir une caractérisation plus détaillée du milieu cible retenu comme référence pour le projet, en particulier au niveau du sol. Dans ce contexte, l'appui d'un écologue familier avec les milieux locaux peut apporter des informations pratiques utiles.

Cet environnement local de référence (ELR) constitue l'objectif de la renaturation, selon un principe de spécificité.

Comme pour la caractérisation de l'ELT, la représentativité de l'ELR pourra être augmentée en identifiant et en caractérisant plusieurs déclinaisons locales du MET, en tenant compte du principe de proportionnalité.

Dans certains cas, les décideurs du projet ont dès le départ un souhait d'ELR, un environnement existant qu'ils connaissent aux alentours du site et qu'ils souhaitent reproduire ou retrouver sur le site. Ce cas de figure correspond donc à une version simplifiée de la séquence « choix du MET puis choix de l'ELR » proposée dans la méthode du présent rapport. Il conviendra alors d'évaluer la pertinence de cet ELR au vu de la réalité des contextes et des objectifs du projet.

Lorsque les moyens disponibles pour le projet ne permettent pas de réaliser des mesures dans un ELR, (ou lorsqu'un ELR n'a pas pu être trouvé à proximité du site), le projet peut retenir le MET visé comme objectif. Les caractéristiques de ce MET peuvent alors être affinées par des dires d'experts (écologues…) basés sur l'état des connaissances du moment (recherches bibliographiques…), et sur la base des informations disponibles sur les milieux historiques du site et autour du site. Par exemple : plateformes de partage de données naturalistes, telles que GéoNat'îdF [127], que le Système d'information sur la biodiversité (SIB) vise à fédérer [128]. Ce cas de figure peut être vu comme une déclinaison du principe de proportionnalité.

En cohérence avec la notion de « bon état écologique » de la directive-cadre sur l'eau (DCE) [129], la proximité de l'état du sol du site avec l'ELR retenu pourrait permettre de caractériser le bon état écologique d'un sol. Ce bon état du sol serait donc relatif, basé sur la comparaison avec un référentiel spécifique à son contexte pédo-bioclimatique.

Dans une logique similaire de mise en regard avec la DCE, la MEB indique que, pour mémoire, « *la renaturation ne recherchera pas nécessairement un retour du sol à son état naturel initial, ce qui en milieu urbain ou industriel reste difficile à atteindre. Un parallèle peut ici être fait avec les masses d'eau fortement modifiées (MEFM) qui sont, selon la directive-cadre sur l'eau, des masses d'eau de surface qui, par suite d'altérations physiques dues aux activités humaines, sont fondamentalement modifiées quant à leur caractère* » [25]. Ceci fait écho à la potentielle impossibilité de revenir à un état historique du site étudié.

Avec cette fois-ci la sémantique issue de la proposition de directive européenne sur la surveillance des sols [17], ce bon état écologique du sol fait écho au concept de « *sol sain* » (section 3.8.4).

4.4 Indicateurs de suivi

Le choix des indicateurs de suivi est souvent un sujet délicat pour les porteurs de projets (section 2), notamment car :

- les coûts associés font partie des principaux freins à la mise en œuvre de projets de renaturation ;
- à l'opposé, la complexité et les multiples dimensions des projets de renaturation invitent à retenir de nombreux indicateurs, afin de permettre une gestion adaptative [126, 130] et de valoriser les résultats obtenus ;
- les valeurs mesurées sont souvent difficiles à interpréter.
  La caractérisation d'un ELR proposée dans la présente méthode vise à apporter une réponse à cette difficulté.

De nombreuses sources disponibles dans la littérature scientifique et technique fournissent des listes d'indicateurs applicables à des projets de renaturation [10, 11, 17, 49, 68, 104, 105, 131-141]. À titre d'exemples, plusieurs types d'indicateurs peuvent être considérés (section 2) :

- indicateurs agro-pédologiques. Par exemple : teneurs en argiles, limons, sables, matière organique (teneur et qualité), minéraux (ex : P_2O_5, K_2O, MgO, azote), capacité d'échange cationique.
  Certains indicateurs de ce type font classiquement partie du diagnostic pédologique initial. Leur importance relative dans le suivi dépend du MET retenu ;
- teneurs en polluants à enjeux, mobilité vers les eaux souterraines (lixiviation). Par exemple : éléments traces métalliques (ETM) ;
- bioindicateurs [140]. Notamment :
  - microorganismes. Par exemple : biomasse microbienne, respiration microbienne, ARISA bactérienne et fongique (ADN), ARN environnemental, inventaires (ex : abondance, diversité, équilibre des populations, groupes fonctionnels),
  - nématodes (microfaune). Par exemple : abondance, diversité, équilibre des populations, groupes fonctionnels,
  - collemboles (mésofaune). Par exemple : abondance, diversité, équilibre des populations, groupes fonctionnels,

    - macrofaune. Par exemple : insectes, millepattes, araignées, lombriciens (abondance, diversité, catégories écomorphologiques (épigés, endogés, anéciques)),
    - oméga 3, pour caractériser la phytotoxicité ;
- transfert des polluants vers les plantes (bioaccumulation) ;
- transfert des polluants vers les escargots (bioaccumulation) ;
- indicateurs caractérisant la végétation (inventaire botanique), et pouvant renseigner indirectement sur certains aspects de l'état du sol (écologie des espèces végétales). Par exemple : pourcentage de couverture végétale, présence ou absence de certaines plantes, abondance et indices de diversité, profondeur racinaire, stade de développement ;
- indicateurs caractérisant les services écosystémiques visés. Par exemple : rafraichissement de l'air, capacité d'infiltration de l'eau, qualité de l'air, fertilité ;
- indicateurs caractérisant la connectivité écologique.

Ces indicateurs techniques peuvent être complétés par des indicateurs de gouvernance, d'adaptation au changement climatique, de co-bénéfices socio-économiques et d'acceptation citoyenne [28, 104, 126].

Au final, plusieurs dizaines d'indicateurs peuvent s'avérer utiles pour un même projet.

Pour une opération de renaturation donnée, le choix des indicateurs de suivi tient compte de plusieurs critères, notamment :

- les caractéristiques les plus importantes du MET visé, selon un principe de spécificité ;
- la surface du site considéré ;
- les compétences disponibles dans l'équipe projet ;
- la simplicité, la robustesse[19], la sensibilité[20] et l'accessibilité[21] des indicateurs considérés ;
- les moyens disponibles pour le projet : budget, contributeurs, temps…
- le cas échéant, les fonctions ciblées prioritairement, les sous-usages projetés, voire les services souhaités ;
- du principe de proportionnalité, au regard des enjeux en présence.

Cette sélection pourrait inclure un socle de base transversal, à appliquer de manière systématique à tout type de projet, complété par des indicateurs spécifiques au MET visé.

Les indicateurs retenus peuvent correspondre à des variabilités temporelles différentes. Par exemple, la variabilité attendue des caractéristiques agro-pédologiques est plus faible que celle liée aux caractéristiques biologiques du site (ex : variations saisonnières). L'élaboration du programme de mesures (état initial et suivi de l'évolution du site) devra donc tenir compte de ces aspects.

Pour les indicateurs associés à une forte variabilité temporelle, les mesures dans l'ELR et sur le site pourront être réalisées au cours d'une même campagne, afin de faciliter les comparaisons, en tenant compte du principe de proportionnalité.

Afin d'homogénéiser les pratiques, et au regard de travaux précédents réalisés par le ministère chargé de l'Écologie [68], la sélection d'indicateurs de suivi peut s'inscrire dans une même structure transversale, basée sur les catégories suivantes :

1. Structure
2. Composition
3. Dégradation
4. Caractéristiques abiotiques

[19] Par exemple : indicateurs normalisés (AFNOR, ISO).
[20] Au regard de l'évolution des effets à suivre.
[21] Par exemple : est-ce faisable par plusieurs laboratoires ? Est-ce que cela correspond pour eux à des prélèvements et analyses de routine ?

Une déclinaison du principe de proportionnalité pourrait débuter par choisir au minimum un indicateur pour chacune de ces catégories, ou bien deux pour chacune des trois premières catégories : un indicateur pour le sol et un indicateur pour la végétation.

Puis, en fonction des enjeux et des caractéristiques du MET visé, les indicateurs peuvent être multipliés dans certaines catégories d'intérêt. Par exemple, pour la catégorie composition, les indicateurs retenus pourraient inclure l'abondance et la diversité d'une espèce d'intérêt de la microfaune, de la mésofaune, de la macrofaune et de la végétation.

Puis, toujours en fonction des enjeux et des caractéristiques du MET visé, si pertinent, les indicateurs peuvent être multipliés dans certaines sous-catégories d'intérêt. Par exemple, l'abondance et la diversité de plusieurs groupes appartenant à la macrofaune peuvent être suivies.

Cet approfondissement progressif, ciblé et itératif s'inscrit dans la même logique que celle proposée pour l'approche TRIADE (projet TRIPODE) [10, 131].

4.5 Interventions

Différentes échelles à considérer

En complément des différents degrés d'intervention[22] humaine envisageables (section 4.1), les actions sur le site à considérer peuvent s'inscrire au sein de différentes échelles spatiales. Par exemple, pour augmenter les niveaux des fonctions visées, il est possible d'agir :

- à l'échelle de certaines zones restreintes du site, lorsque celles-ci présentent des besoins d'actions spécifiques. Par exemple : action de décompacter des terres localement compactées ;
- à l'échelle du site du projet, pour se rapprocher des niveaux de fonctions associés à l'ELR (section 4.3) ;
- à l'échelle du territoire, en considérant les possibilités de connexion avec le réseau écologique local[23], et en inscrivant le projet de renaturation dans des stratégies thématiques[24] ou des démarches locales[25]. Et ainsi, les actions réalisées sur le site pourront être choisis en lien avec les choix d'aménagement locaux.

Principes généraux

Quelques principes généraux peuvent être considérés dans le choix et dans la manière de mener à bien les interventions associées au projet :

- exclure les espèces exotiques envahissantes (EEV) et les plantes connues pour leur caractère allergisant dans la sélection des espèces végétales ;
- privilégier l'utilisation de ressources locales. Par exemple : terres de récupération (« petit cycle des terres »), semences sauvages prélevées à proximité, espèces déjà présentes sur le site et variété d'espèces locales et adaptées aux caractéristiques du site (label Végétal local) [28, 142] ; anticiper dans la sélection des végétaux l'adaptation au changement climatique ;
- privilégier les interventions qui permettent de contribuer à l'adaptation au changement climatique, en particulier dans les zones présentant des îlots de chaleur urbain ou des risques significatifs d'inondation ;
- tenir compte des écosystèmes présents à proximité du site, notamment les trames vertes et brunes [126, 143] ;

[22] Les actions humaines retenues pour le processus de renaturation, de différents types : ingénieries pédologique, civile, écologique, etc.
[23] Ex : augmentation de la taille d'environnements naturels existants, permettant d'accueillir une plus grande diversité d'espèces ; contribution aux corridors écologiques (trames verte et brune, schémas régionaux de cohérence écologique) ; (re)création d'un habitat particulier pour une espèce d'intérêt.
[24] Ex : reconquête de la biodiversité, adaptation au changement climatique, etc.
[25] Ex : Parc Naturel Urbain (PNU).

- « *privilégier des mesures de réparation qui nécessiteraient des mesures de gestion les plus légères possibles, afin de ne pas mettre un milieu « sous intervention humaine » sur du très long terme* » [68], dans l'objectif que les écosystèmes visés soient résilients le plus vite possible ;
- plutôt que de tenter de créer des écosystèmes, préférer créer des conditions favorables à l'apparition d'écosystèmes, au moins dans un premier temps.
  Ainsi, selon la SER, « *les praticiens de la restauration n'effectuent pas le travail proprement dit de rétablissement de l'écosystème. Ils créent plutôt les conditions nécessaires au rétablissement, afin que les plantes, les animaux et les micro-organismes puissent effectuer eux-mêmes le travail de rétablissement* » [80].
- privilégier les « *mesures sans regret* » [104, 144], c'est-à-dire des mesures qui « *doivent être flexibles et s'adapter à la production de nouvelles connaissances, ne pas entrer en conflit avec le principe d'atténuation du changement climatique et présenter des bénéfices pour le territoire, quelle que soit la situation future* » [145] ;
  En particulier, on pourra considérer les co-bénéfices (section 6.1) associés aux différentes solutions fondées sur la nature (SfN) [11, 104, 126, 146, 147] applicables au site.
- Si toutefois des EEV apparaissaient au cours des interventions, maîtriser le risque de développement de ces plantes (parfois aussi appelées « invasives ») [103, 148] ;
- considérer l'opportunité d'utiliser des phytotechnologies pour des zones où la pollution est diffuse ;
- utiliser les résultats fournis par les indicateurs sélectionnés pour alimenter l'apprentissage itératif des processus biologiques en cours sur le site, ainsi que pour permettre une gestion adaptative tout au long du projet.

S'appuyer sur les outils existants

Voici quelques exemples d'outils qui peuvent être utiles aux différents acteurs d'un projet de renaturation.

- Pour la végétalisation, l'outil Sésame - Services ÉcoSystémiques rendus par les Arbres, Modulés selon l'Essence – du Cerema [149] permet « *d'éclairer techniciens et décideurs sur l'opportunité de planter, le choix des essences, les pratiques de gestion adaptées* » [96].
- Selon l'ARB ÎdF, « *en France, la marque Végétal local® […] permet de proposer des espèces floristiques sauvages adaptées à différentes régions* » [28], cette marque de l'OFB se présentant comme « *un outil de traçabilité des végétaux sauvages et locaux* » [142].
- L'outil Plus fraîche ma ville de l'ADEME vise à « *aider les collectivités dans le choix de solutions de rafraîchissement urbain pérennes et durables* » [150], proposant notamment des « *solutions vertes* ».
- L'outil EVNATURB [151] fournit des éclairages aux décideurs, en permettant de tester la mise en œuvre de diverses SfN, et en indiquant leur niveau de pertinence au regard de la gestion des eaux pluviales et de l'atténuation des îlots de chaleur.
- L'outil Floriscope et son système d'informations Végébase (Plante&Cité) visent à aider « *tous les professionnels [à] connaître, choisir et trouver leurs végétaux* » [152].

Assurer la pérennité des actions de renaturation

Différentes formes de valorisations peuvent être mises en place, notamment sous la forme d'opérations de sensibilisation auprès du public [153]. Ces opérations pourraient décrire les écosystèmes présents sur le site [104], leur valeur intrinsèque et la valeur des services qu'ils apportent aux êtres humains, ainsi qu'informer sur les enjeux liés à la présence de pollution résiduelle, la préservation des sols et à la favorisation de la nature. Ces opérations pourraient notamment s'appuyer sur la création d'un chemin pédagogique, qui permettrait de faire également l'expérience directe de la nature créée ou restaurée, et la pose de panneaux d'information. Ces opérations sont de nature à favoriser l'acceptabilité sociale [154].

L'usage de renaturation donne également lieu à la rédaction d'un mémoire, détaillant les retours d'expériences associés au projet [104]. Par exemple : les diagnostics effectués ; le MET, les indicateurs

et l'ELR retenus ; les interventions et les techniques sélectionnées ; les résultats obtenus et les données de surveillance de l'évolution du site. Ce mémoire est transmis aux autorités (DREAL…) et si pertinent à des organismes (ex : AFB, MNHN…) pouvant capitaliser ce type de retours d'expériences - afin de faire progresser l'état des connaissances sur les actions qui sont efficaces et dans quel contexte – et aux autorités chargées de la gestion des environnements naturels. Ainsi, selon la SER, « *un écosystème restauré fournit des services naturels bénéfiques bien au-delà des limites de propriété. Étant donné que la restauration contribue généralement au bien-être de la population, les organismes publics responsables de la protection et de la gestion des ressources naturelles doivent être tenus informés de tout projet de restauration sur leur territoire, quels qu'en soient le propriétaire et le financement* » [103].

Ce document vise également à conserver la mémoire de l'état des milieux du site [16], qui pourrait donner lieu à des restrictions d'usage, dans l'objectif de garantir la pérennité de l'adéquation entre les usages actuels ou les futurs usages du site et l'état de ces milieux [112].

Pour éviter qu'un site renaturé ne soit à nouveau artificialisé [103], la priorité de la nouvelle vocation naturelle du site peut être traduite dans les documents d'urbanisme locaux [155-157], « *par un zonage et des orientations d'aménagement adaptés* » [113], s'appuyant notamment sur des outils de sécurisation avec ou sans acquisition foncière [75, 156]. En complément, selon la Fédération nationale des SCoT, « *les orientations d'aménagement et de programmation (OAP) sont une composante du plan local d'urbanisme qui visent à définir des intentions et orientations d'aménagement qualitatives et peuvent servir à orienter un projet. Les OAP étant une partie intégrante des PLU(i), elles peuvent être facilement utilisées par la collectivité* » [75].

Dans une logique similaire, le règlement européen relatif à la restauration de la nature mentionne : « *Il est important que les États membres mettent en place des mesures visant à ce que les zones couvertes par les types d'habitats relevant du champ d'application du présent règlement et faisant l'objet de mesures de restauration présentent une amélioration continue de leur état jusqu'à atteindre un bon état, et que les États membres mettent en place des mesures visant à ce que, lorsqu'ils ont atteint un bon état, ces types d'habitats ne se détériorent pas de manière significative, afin de ne pas compromettre le maintien ou la réalisation de leur bon état à long terme* » [158].

4.6 Interactions avec les populations riveraines

Opportunité d'acculturation

En France, selon l'Institut national de la statistique et des études économiques (INSEE), « *huit personnes sur dix résidents dans une unité urbaine et près de cinq sur dix dans une unité urbaine de plus de 100 000 habitants. La population est concentrée dans les plus grandes unités urbaines : une personne sur six vit dans l'unité urbaine de Paris et une sur quatre dans une unité urbaine de plus de 200 000 habitants (hors celle de Paris)* » [159].

Et ainsi, selon le Cerema, « *la biodiversité […] est très peu connue. De plus, elle est souvent une préoccupation secondaire pour les citoyens, face à des enjeux environnementaux plus globaux* » [160]. Par ailleurs, avec la raréfaction de l'expérience de nature [161-165], qui peut réduire « *la volonté de promouvoir des actions en faveur de la biodiversité* » [114], le Plan Nature en ville constate qu'aux « *freins opérationnels s'ajoutent parfois des freins culturels liés aux difficultés d'acceptation par les citadins de certaines opérations de reconquête de la biodiversité* » [96]. Face à ces difficultés, l'OFB relaie l'appel de l'IPBES [166] à des « *changements transformateurs* », qui « *concernent notamment nos représentations du vivant, nos relations au vivant* » [167].

En matière de sites et sols pollués, les démarches de gestion mises en place s'appuient sur les principes suivants : prévenir les pollutions futures ; mettre en sécurité les sites nouvellement découverts ; connaître, surveiller et maîtriser les impacts ; traiter et réhabiliter en fonction de l'usage puis pérenniser cet usage ; garder la mémoire ; impliquer l'ensemble des acteurs. Dans la méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués [16], il est explicitement dit que pour réaliser les diagnostics appropriés, il faut s'assurer « *l'implication des populations, des différentes parties prenantes […] tant pour connaître les usages des sols et des milieux que pour accéder aux lieux considérés* » [168].

Dans ce contexte, intégrer des actions d'acculturation des populations dans un projet de renaturation peut favoriser son acceptation [169], composante essentielle de la pérennité de la renaturation.

Ces actions d'acculturation peuvent inclure :

- des débats, des ateliers et des conférences de sensibilisation aux enjeux liés à la présence de pollution résiduelle, à la préservation des sols et au besoin de contact avec la nature ;
- une présentation des écosystèmes présents sur le site avec, quand cela est possible, une visite de la zone renaturée ;
- un descriptif des services écosystémiques créés ou augmentés par le projet de renaturation ;
- des évènements publics pour fêter le démarrage de certains travaux ou l'atteinte de certains résultats.

Possibilités de participation citoyenne

Impliquer les populations riveraines est un complément intéressant à une démarche d'acculturation [160], avec de potentielles synergies. Selon le Laboratoire d'initiatives foncières et territoriales innovantes (LIFTI), « *on peut utilement introduire des espaces de co-production et de dialogue. Ce peut-être par exemple un atelier de construction de vision urbaine « dessine-moi ta friche dans 5 ans », un atelier mémoire, ou encore un comité de gestion riverain, susceptible de se réunir tout au long du projet pour faciliter le travail d'interface* » [24].

Pour certains types de travaux, les populations riveraines pourraient aussi participer à la mise en œuvre et au suivi [78, 91, 103, 104]. D'après l'ARB ÎdF, « *la crise écologique, matérialisée par les changements climatiques et l'érosion de la biodiversité, produit souvent un sentiment individuel d'impuissance. S'inscrire dans une approche participative de désimperméabilisation et de renaturation peut permettre aux citoyens et citoyennes de s'investir concrètement et d'avoir un impact réel sur leur environnement quotidien. C'est aussi une façon de leur proposer de se réapproprier l'espace public* » [28].

Cette participation citoyenne peut prendre plusieurs formes. Par exemple [160] :

- réaliser des enquêtes (questionnaires, entretiens individuels) pour collecter les avis et les suggestions ;
- organiser des ateliers de co-construction pour certaines composantes du projet ;
- mettre en place des chantiers participatifs ;
- organiser un suivi naturaliste s'appuyant sur des programmes de sciences participatives, par exemple en s'appuyant sur :
    - les protocoles proposés dans le programme Vigie-Nature du MNHN [132] ;
    - le réseau de sciences participatives animé par l'association française pour l'étude des sols (AFES) [170, 171] ;
    - l'application INPN Espèces, qui permet de participer à l'inventaire national des espèces vivantes [172].

  Selon l'ARB ÎdF, « *couplées à un accompagnement et une médiation par une association locale, les sciences participatives sont également un bon moyen de valoriser les résultats d'un projet de renaturation auprès de la population* » [28].

Plus généralement, le Conseil économique, social et environnemental (CESE) souligne que « *les « expériences de nature » doivent être soutenues, notamment grâce aux sciences participatives, […] afin de reconnecter avec la nature une population majoritairement urbaine »* [173].

L'encouragement récent à créer et pérenniser des laboratoires vivants (Living Lab) - un dispositif qui permet de faire se rencontrer différentes populations (élus, décideurs, riverains, scientifiques, etc.) - est un outil d'acculturation et de participation citoyenne qui se base sur une démarche d'innovation participative engendrant notamment de nouvelles dynamiques sociales, des connaissances et des actions collectives.

Opportunité d'une présence humaine sur le site

La densification des zones urbaines pose de nombreux défis, dont celui de l'accès à la nature. D'après le ministère chargé de l'Écologie, « *la densité peut être optimisée pour faciliter l'accessibilité aux services et activités, tout en améliorant le cadre de vie de nos concitoyens, notamment en renforçant la présence de la nature en ville. […] La nature en ville est un enjeu d'acceptabilité sociale de la densification* » [174]. Dans une logique similaire, le Plan Nature en ville souligne que « *pour rendre [la densification] vivable, tant pour les humains que les non humains, le développement d'espaces de nature est indispensable* » [96].

Or les zones urbaines actuelles peuvent significativement manquer d'espaces de nature. Par exemple, en Île-de-France, selon les données du Plan vert (2017), 919 communes sont considérées comme carencées[26] en espaces verts [175], « *la place accordée à la nature étant aujourd'hui insuffisante dans la plupart des espaces urbains* » [96].

Projet Extra-Zn - 2023

Le projet Extra-Zn [176], piloté par l'Ineris et subventionné par l'ADEME, a porté sur la production de biomasses enrichies en zinc par phytoextraction pour l'écocatalyse.

Dans le cadre de ce projet, une enquête sociologique a été menée pour connaître les réactions des riverains du site face à cette expérience de phytomanagement. La méthode retenue a été celle des *focus groups*[27].

Voici quelques extraits du rapport, à titre illustratif :

« *les participants ont associé les espaces verts présentés dans les photos à des lieux de sociabilité et de repos […] Les photos E à G, représentant des lieux calmes, ont été vus comme une échappatoire aux inconvénients de la vie urbaine (estimée dense, fermée, bruyante, stressante, oppressante…). La photo H, symbolisant l'absence d'esthétisme et la pauvreté de ce genre de plantations, a été rejetée pour ces raisons par les deux groupes. […]*

Ce second exercice a montré que, quelle que soit l'expérience de phytomanagement entreprise, il est nécessaire de se préoccuper d'esthétisme si l'on veut qu'elle connaisse une bonne réception de la part des riverains. Des espaces verts calmes qui favorisent la vie sociale et présentent une diversité de plantes sont spontanément appréciés, contrairement aux espaces de plantation trop uniformes, jugés peu attractifs » [176].

Une des idées clés issues de la phase de collecte de retours d'expériences (section 2) est l'importance de considérer la possibilité d'une présence humaine dans le cadre d'un usage de renaturation. Pour mémoire, les arguments associés étaient les suivants :

- souhait d'élus locaux que les populations locales puissent se réapproprier le site ;
- augmentation de l'acceptabilité sociale du projet ;
- possibilité d'opérations de sensibilisation aux enjeux liés au contact avec la nature et de la pollution des sols.

Dans cette logique, un projet de renaturation peut avoir pour objectif de « *favoriser les usages et permettre une ré-appropriation de la nature et de la biodiversité par les citoyens* » [104].

Les bénéfices pour la santé associés au contact avec la nature constituent un autre argument en faveur d'une présence humaine sur un site en cours de renaturation, d'autant plus important que plusieurs interviewés ont souligné que les aspects sanitaires restaient la motivation prépondérante, à ce stade, dans la gestion des sites pollués. Si la perception de la valeur intrinsèque des écosystèmes reste à faire

[26] Surface par habitant, accessibilité en proximité.

[27] La méthode des *focus groups* [177] consiste à réunir dans un groupe 6 à 12 personnes concernées par une question particulière et à les faire échanger sur tous les aspects de celle-ci. Les chercheurs sont chargés à la fois de l'animation du groupe et de l'analyse de ce qui s'y dit.

progresser, il est possible de s'appuyer dès maintenant sur des motivations sanitaires pour appuyer un projet de renaturation [178, 179].

Au regard de la définition de la santé par l'Organisation mondiale de la santé (OMS)[28], l'amélioration du cadre de vie est un premier sujet à enjeu. Sur ce thème, selon les auteurs d'une revue de littérature scientifique portant sur l'ensauvagement urbain [164], ce dernier « *promeut des activités humaines moins interventionnistes et plus attentives aux milieux naturels spontanés, mais ne signifie pas pour autant l'absence de présence humaine. Au contraire, notre synthèse de littérature révèle que les espaces sauvages urbains peuvent contribuer à améliorer le cadre de vie des citadins, en créant des interactions et des expériences qualitatives autour de la nature* » [114].

Contact avec la nature : effets bénéfiques pour la santé

L'intérêt pour l'influence de la nature sur la santé a été appuyé, tout particulièrement, par la popularisation en 2005 du concept de « services écosystémiques » par l'Évaluation des écosystèmes pour le Millénaire de l'Organisation des Nations unies (ONU) [53]. Cette évaluation a notamment relié la santé humaine à la biodiversité et aux fonctionnements des écosystèmes [180].

Dans cette logique, l'UICN précise : « *Le concept de SfN reconnaît que la conservation de la biodiversité et la protection des services écosystémiques sont essentielles aux divers aspects du bien-être humain, y compris la santé humaine* » [130] ; et ailleurs [126], « *un consensus scientifique croissant a permis de montrer que « la nature est essentielle à l'existence humaine et à une bonne qualité de vie » [181]* ».

D'après l'AEE, « *les voies par lesquelles les environnements naturels sont bénéfiques pour la santé sont l'exercice physique, la relaxation et la restauration, la cohésion sociale et le soutien du système immunitaire* » [101]. Il s'agit des mécanismes les mieux documentés, et plusieurs autres sont appuyés par des niveaux de preuves variables [60, 102, 182-190].

En termes d'effets mesurés, par exemple, l'exposition aux espaces verts est associée à une réduction de la mortalité et de la morbidité dues à de nombreuses maladies chroniques, à une amélioration de la santé mentale, à une amélioration de l'issue des grossesses et à une réduction du niveau d'obésité.

L'AEE souligne aussi que, du point de vue sociétal, l'accès aux espaces verts favorise la cohésion communautaire, réduisant notamment l'isolement social des groupes minoritaires et des personnes âgées.

Par ailleurs, des actions de participation citoyenne pourraient également contribuer à réduire le sentiment d'impuissance, et ainsi à mieux gérer les ressentis d'éco-anxiété [191] et de solastalgie [192].

Comme le souligne une revue de littérature de Plante & Cité, datée de 2021 et intitulée Effets bénéfiques des espaces de nature en ville sur la santé, « *bien qu'il existe encore certaines divergences théoriques et méthodologiques parmi les travaux scientifiques, au vu du nombre conséquent de résultats il est aujourd'hui considéré que la preuve des effets bénéfiques des espaces de nature en ville sur la santé des citadins n'est plus à fournir* » [185].

Au-delà des mécanismes d'influence plus ou moins bien connus à ce stade, si plus de contact avec la nature est associé à un risque plus faible de maladies, alors on peut faire l'hypothèse que ces maladies ne sont pas seulement liées aux environnements modernes très transformés, incluant l'exposition à des environnements pollués. En changeant de perspective, ces maladies pourraient être aussi liées à la privation de contact avec la nature.

En ce sens, certains auteurs font l'hypothèse que le contact avec la nature est un besoin de base de l'être humain [193-197]. L'OFB résume ainsi : « *Les expériences de nature sont indispensables à tous*

[28] Selon le Préambule de 1946 à la constitution de l'OMS, la santé est un « *état de complet bien-être physique, mental et social et ne consiste pas seulement en une absence de maladie et d'infirmité* ».

les âges de la vie » [198] ; et Santé publique France ainsi : « *Faire de la protection de la biodiversité un enjeu de santé publique est une nécessité car une nature "en bonne santé" est essentielle à la (sur)vie des êtres humains* » [199].

Maîtrise du risque de nuisances

La présence de nature en ville peut être associée à des préoccupations concernant le risque de nuisances liées à certaines espèces [28, 96, 126, 173, 186]. Ces préoccupations concernent les populations visitant le site et les populations riveraines. Par exemple :

- allergies liées à certaines plantes ;
- maladies transmissibles par certains animaux ;
- « *certains aspects des espaces sauvages, comme la végétation dense qui réduit la visibilité, peuvent engendrer de l'anxiété ou un sentiment de négligence et d'abandon* » [114].
  Plus généralement, les friches industrielles peuvent symboliser, « *aux yeux des anciennes familles ouvrières (comme des habitants et des commerçants du voisinage), le chômage, la crise économique, la jeunesse désœuvrée, la fin de façons de vivre et de manières d'être* » [71].

Certaines de ces préoccupations sont fondées, d'autres sont basées sur des informations inexactes. Pour ces dernières, les opérations de sensibilisation considérées plus haut pourront être une réponse de première approche, notamment si elles incluent des retours d'expériences issus de projets similaires. Pour les autres préoccupations, il pourra s'agir de trouver la meilleure articulation entre les différents enjeux en présence, incluant :

- la sécurité sanitaire des riverains, qui peut se traduire par exemple par une liste de plantes à éviter, car connues pour leur pouvoir allergisant, en complément de la démarche de maîtrise des sources de pollution ;
- la diversité des écosystèmes issus du projet de renaturation, qui peut également se traduire par une liste d'espèces locales ;
- l'adaptation au changement climatique, qui peut ici aussi se traduire par une liste d'espèces adaptées aux prévisions des projections climatiques locales.

Ces exemples illustrent que plus les besoins en présence sont nombreux, plus le nombre de listes à croiser peut augmenter, diminuant ainsi l'ampleur du résultat obtenu par croisement. Par conséquent, une démarche de compromis proactive [60], le plus tôt possible au sein du projet de renaturation, sera probablement nécessaire dans certaines situations, ce qui plaide à nouveau pour créer des liens forts entre le projet de renaturation et les populations en présence.

Néanmoins, d'une manière générale, le bon fonctionnement des écosystèmes favorise la compétition interspécifique, ce qui peut contribuer à limiter la prolifération des espèces problématiques (ex : moustiques, rongeurs…) [153].

Par ailleurs, des interventions légères devraient pouvoir répondre à de potentiels sentiments de négligence et d'abandon. Par exemple : « *la création de chemins bien tracés, de petites zones récréatives gérées ou l'installation de petits mobiliers pour signaler que les espaces sauvages urbains restent accessibles pour les habitants et ne sont pas abandonnés* » [114], panneaux d'information, etc.

Concernant les risques de « *disservices* » à forts enjeux, des indicateurs de suivi spécifiques peuvent être mis en place en complément [104].

Plus généralement, une gestion de projet adaptative et participative devrait permettre de réduire le risque de nuisance, mesurée et perçue, en complément de la prise en compte de ces aspects dans la phase de conception du projet.

L'ensemble de ces éléments s'inscrit dans la logique de la « *stratégie de communication* » indiquée dans la méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués : « *Préalablement aux travaux puis*

tout au long de la démarche, notamment si les opérations de réhabilitation sont susceptibles de conduire à des nuisances […], la mise en place d'une communication et d'échanges réguliers avec les riverains apparaît incontournable de même que la désignation d'un interlocuteur identifié » [16].

4.7 Usage de renaturation et Plan de gestion

Cohérence avec la logique et le contenu du Plan de gestion

L'usage de renaturation constitue un des usages qui peut être retenu [1, 2] dans le cadre du Plan de gestion de la méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués [16]. En ce sens, la démarche méthodologique décrite dans le présent rapport vise à s'inscrire dans la démarche du Plan de gestion, en tant qu'une de ses composantes potentielles. En particulier, ce nouvel usage vient augmenter les options pouvant être considérées dans les « *études des scénarios de gestion* » [16].

Comme pour les autres usages associés au Plan de gestion, l'usage de renaturation tel que décrit dans ce rapport présente les caractéristiques types suivantes :

- Il fait l'objet d'un choix multicritère en entrée du Plan de gestion, un choix proposé par le gestionnaire du site aux autorités locales.
  Ce choix multicritère s'appuie notamment sur :
  - la réalisation de différents types d'études préalables, pouvant intégrer le résultat de campagnes de terrain ;
  - l'identification des enjeux en présence, incluant les « *ressources naturelles à protéger* » [16] ;
  - l'état écologique du site, incluant « *les possibilités de régénération ou d'atténuation naturelle des milieux* » [16] ;
  - la prise en compte des contraintes et des documents d'urbanisme applicables.
- Il est associé à différentes possibilités de techniques d'intervention, qui peuvent être comparées avec un bilan coûts-avantages.
- Il peut conduire à des restrictions d'usages, pour le site entier ou pour certaines zones du site. Par exemple : interdiction d'accès, restrictions de certaines activités pouvant endommager les écosystèmes.
- Il tient compte de potentielles variations spatiales dans les niveaux de pollution présents sur le site.
- Il se base sur des objectifs de réhabilitation : la démarche décrite dans ce rapport propose que ces objectifs soient des caractéristiques propres à l'ELR.
  Ces caractéristiques sont décrites avec une sélection d'indicateurs.
  L'évolution attendue des mesures de ces indicateurs peut être caractérisée par certaines étapes clés, qui peuvent servir à la définition de contrôles de l'efficacité des interventions réalisées.
  Et ainsi, le Plan de gestion associé à un usage de renaturation peut être « *progressif, itératif, évolutif tout en étant interactif avec les données acquises et les orientations envisagées* » [16].
- Il inclut un programme de surveillance, spécifique à l'état actuel du site et à l'ELR visé.
- Il est associé à des mécanismes de conservation de la mémoire.

Les schémas conceptuels associés à l'usage de renaturation constituent d'autres caractéristiques importantes : ils sont décrits dans la session suivante.

Scénarios d'exposition associés à l'usage de renaturation

Par homogénéité avec le guide de l'Ineris sur les usages [2], les scénarios d'exposition humaine liés à l'usage de renaturation (Tableau 7) sont décrits par :

« *- les éléments potentiels constitutifs d'un aménagement ou d'un projet de construction (par exemple : bâti, espaces verts, parkings, type d'installation, etc.),*

- les usages des milieux d'exposition dans le périmètre du site,

- le type de populations fréquentant ces aménagements (adultes et/ou enfants, résidents, personnes fréquentant régulièrement ou occasionnellement les lieux (visiteurs) ou travailleurs),

- les voies d'exposition des populations ».

Tableau 7 : Usage de renaturation : potentielles expositions humaines associées

Éléments constitutifs de projets d'aménagement		**Usages des milieux**	**Populations exposées**	**Voies d'exposition**
Friches[29] (ex : terrains inutilisés)	Accès interdit au public (ex : réserve naturelle intégrale ; libre évolution jusqu'à la forêt)	Activités de gestion occasionnelles	Travailleurs gestionnaires du site	Inhalation de vapeurs et de particules de sol en suspension (ré-envol)
	Chemins balisés faits de matériaux non pollués et visant à éviter le contact avec le sol[30] (ex : espace naturel sensible)	Activités d'entretien et de gestion régulières	Travailleurs gestionnaires du site	Ingestion non intentionnelle de sol (contact mains-bouche)
		Visite pédagogique, promenade ; occasionnelle ou régulière	Adultes et enfants visiteurs - population générale	Inhalation de vapeurs et de particules de sol en suspension (ré-envol)
Espaces de nature (de nature ordinaire à nature à forts enjeux écologiques)		Usage récréatif de plein air, occasionnel ou régulier. Ex : parcs, aires de jeu.	Adultes et enfants - population générale	Inhalation de vapeurs et de particules de sol en suspension (ré-envol)
		Usage résidentiel, incluant un jardin d'agrément (non potager)		
		Usage d'accueil de populations sensibles. Ex : aires de jeu et espaces verts intégrés dans des établissements		Ingestion non intentionnelle de sol (contact mains-bouche)
Terres cultivées (ex : agriculture à visée non alimentaire : productions horticoles, énergétiques…)		Usage agricole (non alimentaire) avec gestion écologique du terrain, non destructrice des écosystèmes	Travailleurs agricoles, usagers de jardins privés (adultes et enfants)	Inhalation de vapeurs et de particules de sol en suspension (ré-envol)
				Ingestion non intentionnelle de sol (contact mains-bouche)

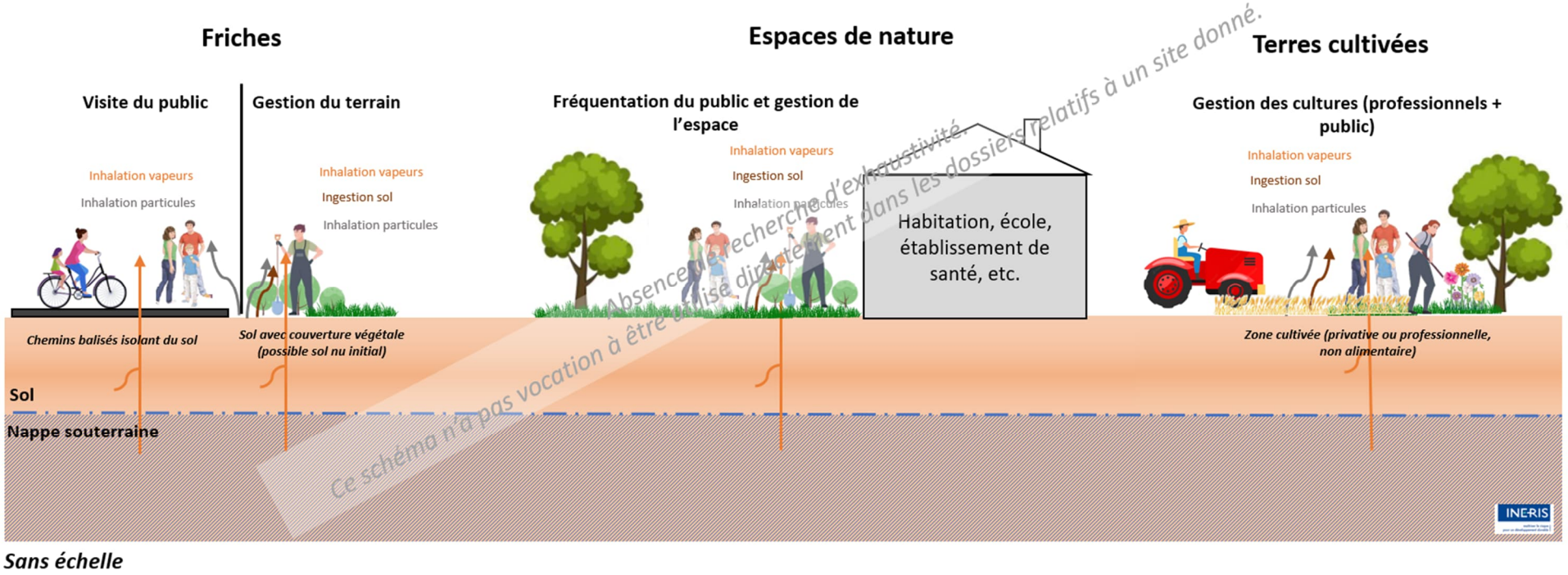
En cohérence avec le décret n°2022-1588, l'usage de renaturation est considéré indépendamment ou concomitamment avec d'autres usages sur un même site. Par exemple : usage récréatif de plein air, usage résidentiel, usage d'accueil de populations sensibles, usage agricole.

Dans le cadre de ce rapport, les expositions considérées sont celles associées spécifiquement à l'usage de renaturation (Tableau 7, Figure 11). Les expositions associées aux autres usages ont été décrites dans un rapport précédent de l'Ineris [2].

[29] D'après le site SSP-Infoterre [14], une friche se définit comme un « *site inutilisé, éventuellement dégradé par la présence d'installations, de déchets, d'une pollution avérée ou suspectée et dont l'état, la configuration ou l'occupation totale ou partielle ne permet pas de retrouver un usage [autre que l'usage de renaturation] sans un aménagement ou des travaux préalables* ».

[30] Par exemple, ce chemin peut être « revêtu » ou « recouvert », le guide Ineris sur les usages de 2023 [2] définissant ces deux termes ainsi : « *Un sol est réputé revêtu si sa structure de surface est réalisée à l'aide d'asphalte, d'enrobés bitumeux, d'enduits superficiels d'usure, de béton, de ciment ou de pavés jointoyés par un matériau lié.* » et « *Un sol est réputé recouvert s'il est recouvert par au moins 30 cm de matériaux naturels ou équivalents, supposés être sains.* »

Concernant ces multiples usages sur un même site, Catherine et Raphaël Larrère proposent « *un autre regard sur les activités humaines* » [71] : « *La bonne nouvelle de l'écologie contemporaine est de réinscrire les hommes et leurs activités dans la nature et de montrer qu'il n'y a pas nécessairement contradiction entre les besoins et aspirations des humains et leur environnement naturel. On peut donc s'acheminer vers une façon d'habiter la nature sans la détruire. Certains ont même parlé d'« écologie de la réconciliation »* » ou encore de « Win-Win Ecology » [200], ou encore d'« éthique du partenariat » [201].



Sans échelle

Figure 11 : Schémas conceptuels associés à l'usage de renaturation

Références

1. République française. Charte de l'environnement. 2004. https://www.conseil-constitutionnel.fr/le-bloc-de-constitutionnalite/charte-de-l-environnement-de-2004

2. Ministère chargé de l'Écologie, Ministère chargé de la Santé. Troisième Plan National Santé Environnement (PNSE 3). 2015. https://sante.gouv.fr/IMG/pdf/pnse3_v_finale.pdf

3. World Health Organization, Regional Office for Europe. Environmental health action plan for Europe. Second European Conference on Environment and Health. Helsinki, 20–22 June 1994. 1994. EUR/ICP/CEH 212. https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/347386/WHO-EURO-1994-3844-43603-61261-eng.pdf?sequence=1

4. World Health Organization, Regional Office for Europe. Health21: the health for all policy framework for the WHO European Region. *European Health for All, Series No. 6*, 1999. https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/272657/9789289013499-eng.pdf

5. Organisation mondiale de la santé (OMS) - Bureau régional de l'Europe. Environnement et santé : la Charte européenne et son commentaire. *Première conférence européenne sur l'environnement et la santé, Francfort, 7-8 décembre 1989*, 1989. https://www.who.int/europe/fr/publications/i/item/9789289011266

6. Bonvallot N, Harpet C. *Glossaire de santé environnementale : 40 notions pour connaitre, comprendre et protéger la santé des populations dans leur environnement*. Presses de l'EHESP, 2024.

7. Organisation mondiale de la santé (OMS). Questions fréquentes - Comment l'OMS définit-elle la santé ? https://www.who.int/fr/about/frequently-asked-questions [Consulté le : 09/02/2026]

8. Vidal F, 2019. Arrêté du 22 février 2019 définissant les compétences des diplômés du doctorat et inscrivant le doctorat au répertoire national de la certification professionnelle. JORF n°0055 du 6 mars 2019. https://univ-avignon.fr/wp-content/uploads/2023/03/Arrete-du-22-fevrier-2019-definissant-les-competences-des-diplomes-du-doctorat-et-inscrivant-le-doctorat-au-repertoire-national-de-la-certification-professionnelle-Legifrance.pdf.

9. Comité d'évaluation (Codev) du PNSE2. Évaluation du deuxième Plan national santé-environnement. *Haut Conseil de la santé publique (HCSP)*, 2013. https://www.hcsp.fr/explore.cgi/avisrapportsdomaine?clefr=379

10. World Health Organization (WHO), United Nations Children's Fund (UNICEF), Food and Agriculture Organization (FAO) *et al*. Contributing to One world, One health. A Strategic Framework for reducing risks of infectious diseases at the animal-human-ecosystems interface. 2008. https://www.fao.org/4/aj137e/aj137e00.pdf

11. Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES). Assessment Report on the interlinkages among biodiversity, water, food and health, in the context of climate change (Nexus Report). 2024. https://www.ipbes.net/nexus

12. Prévot A-C, Milon B. *La nature à l'oeil nu*. CNRS Éditions, 2021.

13. Kahn PH. *The human relationship with nature: Development and culture*. MIT Press, 1999.

14. Carson R. *The sense of wonder*. Harper Perennial, 1956.

15. Kellert SR. *Birthright: People and Nature in the Modern World*. Yale University Press, 2012.

16. Equator Principles Association. Equator Principles. EP4. 2020. https://equator-principles.com/app/uploads/The-Equator-Principles_EP4_July2020.pdf

17. Deuxième Plan national santé environnement (PNSE 2). *Ministère chargé de l'Écologie, Ministère chargé de la Santé*, 2009. https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/documents/PNSE2.pdf
18. Karr G, Bonnard R. Tierce expertise d'un volet sanitaire. Refinal Industries. Site de Sequedin (59) [Disponible sur demande auprès de la DREAL locale]. *Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris)*, 2025. Ineris-227659-2837633- v1.0.
19. Karr G, Guérin S, Bonnard R. Tierce expertise de l'étude des potentiels effets sanitaires du site Arkema de La Chambre (73) [Disponible sur demande auprès de la DREAL locale]. *Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris)*, 2024. Ineris-229552-2808380-v1.0.
20. Karr G, Velly N, Ramel M. Tierce expertise de l'interprétation de l'état des milieux (IEM) et de l'évaluation des risques sanitaires (ERS) du site Fibre Excellence de Tarascon (13) [Disponible sur demande auprès de la DREAL locale]. *Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris)*, 2018. INERIS-DRC-18-171125-00097B.
21. Karr G, Velly N, Ramel M. Utilisation d'encens et qualité de l'air intérieur : enjeux sanitaires, substances d'intérêt, bonnes pratiques. *Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris)*, 2015. INERIS-DRC-14-144018-06268C. https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/Rapport-Ineris-DRC-14-144018-06268c-encens-vc-1455890922_0.pdf
22. Karr G, Velly N, Ramel M. Utilisation de produits ménagers et qualité de l'air intérieur : enjeux sanitaires liés à une séance de ménage, substances d'intérêt et bonnes pratiques. *Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris)*, 2019. INERIS-DRC-19-179887-00900A. https://www.ineris.fr/fr/utilisation-produits-menagers-qualite-air-interieur-enjeux-sanitaires-lies-seance-menage-substances
23. Karr G, Velly N, Ramel M. Utilisation de désodorisants non-combustibles et qualité de l'air intérieur : enjeux sanitaires, substances d'intérêt, bonnes pratiques. *Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris)*, 2020. Ineris-20-200840-1997302-v1.0. https://www.ineris.fr/sites/default/files/contribution/Documents/Rapport-Ineris-20-200840-1997302-v1-MTES-BSE_DNC_complet.pdf
24. Association française de normalisation (AFNOR). Norme NF EN 16738 - Sécurité des émissions des désodorisants combustibles - Méthodes d'essais. 2015. https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-en-16738/securite-des-emissions-des-desodorisants-combustibles-methodes-dessais-/fa182203/46559
25. Association française de normalisation (AFNOR). Norme NF EN 16739 - Sécurité des émissions des désodorisants à combustion - Méthodologie de l'évaluation des résultats d'essais et application des limites d'émission recommandées. 2015. https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-en-16739/securite-des-emissions-de-desodorisants-a-combustion-methodologie-de-levalu/fa182202/46563
26. Agence française de normalisation (AFNOR). NF EN 16740 - Sécurité des émissions des désodorisants à combustion. Informations de sécurité pour l'utilisateur. 2015. https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-en-16740/securite-des-emissions-des-desodorisants-a-combustibles-informations-de-sec/fa182201/46560
27. European Committee for Standardization (CEN). Emission safety of combustible air fresheners - Test methods. CEN/TC 421. FprEN 16738:2015. 2015. https://www.en-standard.eu/bs-en-16738-2015-emission-safety-of-combustible-air-fresheners-test-methods/
28. European Committee for Standardization (CEN). Emission safety of combustible air fresheners - Methodology for the assessment of test results and application of recommended

emission limits. CEN/TC 421 - FprEN 16739:2015. 2015. https://www.en-standard.eu/bs-en-16739-2015-emission-safety-of-combustible-air-fresheners-methodology-for-the-assessment-of-test-results-and-application-of-recommended-emission-limits/
29. European Committee for Standardization (CEN). Emission safety of combustible air fresheners - User safety information. CEN/TC 421 - FprEN 16740:2015. 2015. https://www.en-standard.eu/bs-en-16740-2015-emission-safety-of-combustible-air-fresheners-user-safety-information/?srsltid=AfmBOopVlk6QfK5OOrWhrtWK97w-EkCaMUBvEE2v4j9vRoyeZ5bY3dAW
30. Journal officiel de la République française (JORF) n°0160 du 13 juillet 2010, 2010. Loi n°2010-788 du 12 juillet 2010 portant engagement national pour l'environnement (1), dite "Loi Grenelle 2". https://www.legifrance.gouv.fr/eli/loi/2010/7/12/DEVX0822225L/jo/texte.
31. Ministère chargé de l'Écologie, Ministère chargé de la Santé. Plan d'actions sur la Qualité de l'Air Intérieur (PQAI). 2013. https://sante.gouv.fr/IMG/pdf/Plan_Qualite_de_l_air_interieur_octobre_2013.pdf
32. Ministère chargé de l'Écologie. Guide pratique - Pour une meilleure qualité de l'air dans les lieux accueillant des enfants et adolescents. 2019. https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/publications/QAI_guide_pratique_2019.pdf
33. Nicolas M, Karr G, Quivet E *et al*. Exposition aux polluants émis par les bougies et les encens dans les environnements intérieurs - Émissions et risques sanitaires associés - projet EBENE. *Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB), Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris), Laboratoire de Chimie de l'Environnement (LCE), Agence de la transition écologique (ADEME)*, 2017. https://librairie.ademe.fr/1787-ebene-exposition-aux-polluants-emis-par-les-bougies-et-les-encens-dans-les-environnements-interieurs.html
34. Nicolas M, Karr G, Real E *et al*. Impact des produits d'entretien sur la qualité de l'air intérieur – Définition d'un protocole d'essais simple et harmonisé pour l'évaluation des émissions en composés volatils. Projet PEPS (APR ADEME/CORTEA). *Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB), Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris), Agence de la transition écologique (ADEME)*, 2018. https://librairie.ademe.fr/air-et-bruit/875-impact-des-produits-d-entretien-sur-la-qualite-de-l-air-interieur.html
35. Migne-Fouillen V, Karr G. Impact du renouvellement d'appareils non performants de chauffage domestique au bois sur la qualité de l'air intérieur - Projet QAI Arve : Mesures réalisées in situ en Vallée de l'Arve dans des logements chauffés au bois. *Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris), Agence de la transition écologique (ADEME)*, 2019. https://librairie.ademe.fr/air/553-impact-du-renouvellement-d-appareils-non-performants-de-chauffage-domestique-au-bois-sur-la-qualite-de-l-air-interieur.html
36. Nicolas M, Karr G, Quivet E. Composés volatils et particulaires émis par les désodorisants non combustibles : définition d'un protocole d'essai, évaluation des émissions et analyse des risques sanitaires / Projet PRESSENS. *Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB), Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris), Laboratoire de Chimie de l'Environnement (LCE), Agence de la transition écologique (ADEME)*, 2021. https://librairie.ademe.fr/air/4986-composes-volatils-et-particulaires-emis-par-les-desodorisants-non-combustibles.html
37. Karr G, Albinet A, Quivet E *et al*. *Scented candles and incenses as indoor air fresheners: Health risk assessment from real emission measurements*. à *14th International Conference on Indoor Air Quality and Climate (Indoor Air 2016)*. 2016. Ghent, Belgium.

38. Karr G, Ramel M, Nicolas M. *Non-combustible air fresheners: exposure and health risk assessment*. à *15th International Conference on Indoor Air Quality and Climate (Indoor Air 2018)*. 2018. Philadelphia, United States of America.
39. Karr G, Nicolas M, Quivet E *et al*. *Non-combustible air fresheners tested in an experimental house: exposure and health risk assessment*. à *16th Conference of the International Society of Indoor Air Quality & Climate (Indoor Air 2020)*. 2020. Seoul, South Korea - on line.
40. Karr G. Produits de consommation courante et qualité de l'air intérieur : enjeux sanitaires, substances d'intérêt, bonnes pratiques [Disponible sur demande auprès de l'Ineris]. *Bulletin du Réseau Recherche Santé Environnement Intérieur (RSEIN)*, 2019.
41. Karr G, Quivet E, Ramel M *et al*. Sprays and diffusers as indoor air fresheners: Exposure and health risk assessment based on measurements under realistic indoor conditions. *Indoor Air* 2021 ; 00(1-11). DOI: https://doi.org/10.1111/ina.12923.
42. Karr G, Nicolas M, Maupetit F *et al*. Cleaning product emissions and indoor built environments: Exposure and health risk assessments from experiments under realistic indoor conditions. *Building and Environment* 2021 ; 206 : 108384. DOI: https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108384.
43. Karr G, Ramel M. Qualité de l'air intérieur et santé : quels sont les produits de consommation présentant les risques individuels les plus élevés ? *Environnement, Risques & Santé* 2021 ; 20(5) : 446-456. DOI: https://doi.org/10.1684/ers.2021.1588.
44. Site Internet du YearBook Santé et Environnement. Comité scientifique du YearBook Santé et Environnement. https://www.yearbook-ers.jle.com/comite.phtml [Consulté le : 29/07/2025]
45. Commission nationale de la déontologie et des alertes en matière de santé publique et d'environnement (cnDAspe). La Commission et son rôle. 2019. https://www.alerte-sante-environnement-deontologie.fr/deontologie-et-alertes-en-sante-publique-et-environnement/la-commission/article/la-commission [Consulté le : 29/07/2025]
46. Journal officiel de la République française (JORF) n°0230 du 4 octobre 2022, 2022. Décret n° 2022-1284 du 3 octobre 2022 relatif aux procédures de recueil et de traitement des signalements émis par les lanceurs d'alerte et fixant la liste des autorités externes instituées par la loi n° 2022-401 du 21 mars 2022 visant à améliorer la protection des lanceurs d'alerte. https://www.legifrance.gouv.fr/eli/decret/2022/10/3/JUSC2222368D/jo/texte.
47. Journal officiel de la République française (JORF) n°0090 du 17 avril 2013, 2013. LOI n° 2013-316 du 16 avril 2013 relative à l'indépendance de l'expertise en matière de santé et d'environnement et à la protection des lanceurs d'alerte (1). NOR : DEVX1240666L. https://www.legifrance.gouv.fr/eli/loi/2013/4/16/DEVX1240666L/jo/texte.
48. Toutut-Picard É, Karr G, Leclerc O *et al*. Avis relatif au renforcement de l'organisation, du contrôle et de la recherche en radioprotection et sûreté nucléaire. *Commission nationale de la déontologie et des alertes en matière de santé publique et d'environnement (cnDAspe)*, 2023. https://www.alerte-sante-environnement-deontologie.fr/IMG/pdf/avis_cndaspe_surete_nucleaire.pdf
49. Commission nationale de la déontologie et des alertes en matière de santé publique et d'environnement (cnDAspe). Analyse comparative des règles de gestion des liens d'intérêts au sein des autorités compétentes en matière d'évaluation des risques et d'autorisation de la mise sur le marché des pesticides dans les Etats membres de l'UE. Actualisation et extension du document publié en juin 2022. 11 avril 2023. 2023. https://www.alerte-sante-environnement-deontologie.fr/IMG/pdf/20230411_fr_analyse_comparative_gestion_lien_d_interet.pdf

50. Karr G, Zmirou-Navier D. Autorisation des pesticides dans l'Union Européenne : gestion des liens d'intérêts par les autorités compétentes. *YearBook Santé et Environnement*, 2023. https://www.yearbook-ers.jle.com/index.phtml?cle_parution=5673
51. Karr G, Prete G, Duboc S *et al*. Management of links of interest in European Union expertise authorities dealing with plant protection products: comparative analysis and recommendations. *Environmental Sciences Europe* 2023 ; 35(1) : 96. DOI: https://doi.org/10.1186/s12302-023-00760-1.
52. Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris). Évaluation de l'état des milieux et des risques sanitaires - Démarche intégrée pour la gestion des émissions de substances chimiques par les installations classées. 2021. Ineris-200357-2563482-v1.0. https://www.ineris.fr/sites/default/files/contribution/Documents/Ineris_GuideERS-Juillet2021-A4-%2310Quatro_Web.pdf
53. Ministère chargé de l'Écologie, Ministère chargé de la Santé. Premier Plan national santé environnement (PNSE). 2004. https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/documents/pnse1-2.pdf
54. Ministère chargé de l'Écologie, 2022. Décret n°2022-1588 du 19 décembre 2022 relatif à la définition des types d'usages dans la gestion des sites et sols pollués. NOR : TREP2211324D. https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000046761045.
55. Direction générale de la Prévention des Risques (DGPR) - Bureau du Sol et du Sous-Sol. Méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués. *Ministère chargé de l'Écologie*, 2017. https://www.ecologie.gouv.fr/sites-et-sols-pollues#scroll-nav__2
56. Karr G, Bert V. Méthodologie pour encadrer l'usage de renaturation dans la gestion des sites et sols pollués : premier rapport d'étape. *Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris)*, 2025. Ineris-213291-2772344-v3.0. https://www.ineris.fr/fr/methodologie-encadrer-usage-renaturation-gestion-sites-sols-pollues-premier-rapport-etape
57. Karr G, Bert V. *Ecological restoration and management of polluted soils*. à *11th World Conference on Ecological Restoration (SER2025)*. 2025. Denver, United States of America.
58. Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses). Comité d'experts spécialisé Évaluation des risques chimiques liés aux articles et produits de consommation (CES CONSO). 2024. https://www.anses.fr/fr/content/evaluation-des-risques-chimiques-lies-aux-articles-et-produits-de-consommation [Consulté le : 30/07/2025]
59. Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris). Groupe de travail sur l'évaluation des expositions (WPEA). https://www.ineris.fr/fr/recherche-appui/risques-chroniques/substances-chimiques-agents-physiques/activites-ineris-ocde-4 [Consulté le : 30/07/2025]
60. Haut Conseil de la santé publique (HCSP). CSRE - Commission spécialisée Risques liés à l'environnement. https://www.hcsp.fr/Explore.cgi/groupe?clef=8426
61. Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses). Élaboration de méthodologies de calcul en vue d'informer les consommateurs sur les dangers sanitaires et environnementaux des produits ménagers. Rapport d'expertise collective. 2024. https://www.anses.fr/sites/default/files/CONSO2021-SA-0231.pdf
62. Haut Conseil de la santé publique (HCSP). Valeurs repères d'aide à la gestion de la qualité de l'air intérieur. Présentation de la démarche méthodologique. 2019. https://www.hcsp.fr/Explore.cgi/Telecharger?NomFichier=hcspr20190108_valrepdaidlagesdelaquadelairint.pdf

63. Haut Conseil de la santé publique (HCSP). Valeurs repères d'aide à la gestion de la qualité de l'air intérieur. Le benzène. 2024. https://www.hcsp.fr/Explore.cgi/Telecharger?NomFichier=hcspr20241003_varedailagedelaqudelaiinpolebe.pdf
64. Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). Assessment of chemicals - Exposure Assessment Models Used in a Regulatory Context. https://www.oecd.org/en/topics/assessment-of-chemicals.html [Consulté le : 30/07/2025]
65. Slama R. Relations entre santé humaine et environnement dans l'Anthropocène. Cours et séminaires au Collège de France. Chaire Santé publique. *Collège de France*, 2022. https://www.youtube.com/watch?v=cXyyPK1qGXs&list=PLOj9pZ2YNGZ-S9yLG0nHtLUUfiAp-pnH2
66. Fouillet A, Cadillac M, Coudin É *et al*. Grandes causes de mortalité en France en 2023 et tendances récentes. *Bulletin Epidémiologique Hebdomadaire*, 2025. https://beh.santepubliquefrance.fr/beh/2025/13/2025_13_1.html
67. Rojas-Rueda D, Vrijheid M, Robinson O *et al*. Environmental Burden of Childhood Disease in Europe. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 2019 ; 16(6). DOI: https://doi.org/10.3390/ijerph16061084.
68. European Environment Agency (EEA). Healthy environment, healthy lives: how the environment influences health and well-being in Europe. 2020. https://www.eea.europa.eu/publications/healthy-environment-healthy-lives
69. Santé publique France (SpF). Impact de la pollution de l'air ambiant sur la mortalité en France métropolitaine. Réduction en lien avec le confinement du printemps 2020 et nouvelles données sur le poids total pour la période 2016-2019. 2021. https://www.santepubliquefrance.fr/determinants-de-sante/pollution-et-sante/air/documents/enquetes-etudes/impact-de-pollution-de-l-air-ambiant-sur-la-mortalite-en-france-metropolitaine.-reduction-en-lien-avec-le-confinement-du-printemps-2020-et-nouvelle
70. Lelieveld J, Klingmüller K, Pozzer A *et al*. Cardiovascular disease burden from ambient air pollution in Europe reassessed using novel hazard ratio functions. *European Heart Journal* 2019 ; 40(20) : 1590-1596. DOI: https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehz135.
71. Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses). Étude exploratoire du coût socio-économique des polluants de l'air intérieur. 2014. https://www.anses.fr/fr/system/files/AUT-Ra-CoutAirInterieurSHS2014.pdf
72. Boulanger G, Bayeux T, Mandin C *et al*. Socio-economic costs of indoor air pollution: A tentative estimation for some pollutants of health interest in France. *Environment international* 2017 ; 104 : 14-24. DOI: https://doi.org/10.1016/j.envint.2017.03.025.
73. Buguet-Degletagne B. Évaluation du troisième plan national santé environnement et préparation de l'élaboration du plan suivant - rapport N°2017-176R. *Inspection générale des affaires sociales (IGAS)*, 2018. https://igas.gouv.fr/Evaluation-du-3e-plan-national-sante-environnement-et-preparation-de-l
74. World Health Organization (WHO). Public Health and the Environment. Country profiles of Environmental Burden of Disease: France. 2009. https://cdn.who.int/media/docs/default-source/environmental-health-impacts/gbd-country-profiles/france.pdf
75. Dab W. *Santé et environnement. Que sais-je ? n°3771*. Presses Universitaires de France / Humensis, 2020.
76. Carotti S, Dahan M, Saïe M *et al*. La santé-environnement : recherche, expertise et décision publiques. *Inspection générale de l'éducation, du sport et de la recherche (IGESR). Inspection*

générale des affaires sociales (IGAS). Inspection générale des finances (IGF). Conseil général de l'alimentation, de l'agriculture et des espaces ruraux (CGAAER). Conseil général de l'environnement et du développement durable (CGEDD), 2020. https://igedd.documentation.developpement-durable.gouv.fr/notice?id=Affaires-0011901&reqId=232827ac-9e7a-4b1c-a9a6-274a09ef180a&pos=2
77. Organisation mondiale de la Santé. Bureau régional de l'Europe. Déclaration de la Sixième Conférence ministérielle sur l'environnement et la santé. Ostrava (République tchèque), 13-15 juin 2017. 2017. WHO/EURO:2017-3008-42766-59663. https://www.who.int/europe/fr/publications/i/item/WHO-EURO-2017-3008-42766-59662
78. Landrigan PJ, Fuller R, Acosta NJR *et al*. The Lancet Commission on pollution and health. *The Lancet* 2018 ; 391(10119) : 462-512. DOI: https://doi.org/10.1016/S0140-6736(17)32345-0.
79. Trasande L, Zoeller RT, Hass U *et al*. Estimating Burden and Disease Costs of Exposure to Endocrine-Disrupting Chemicals in the European Union. *The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism* 2015 ; 100(4) : 1245-1255. DOI: https://doi.org/10.1210/jc.2014-4324.
80. Beausoleil C, Beronius A, Bodin L *et al*. Review of non-monotonic dose-responses of substances for human risk assessment. *EFSA Supporting Publications* 2016 ; 13(5) : 1027E. DOI: https://doi.org/10.2903/sp.efsa.2016.EN-1027.
81. Santé publique France (SpF). Santé environnementale : une priorité de santé publique. 2022. https://www.santepubliquefrance.fr/presse/2022/sante-environnementale-une-priorite-de-sante-publique
82. Tong S, Mather P, Fitzgerald G *et al*. Assessing the vulnerability of eco-environmental health to climate change. *International journal of environmental research and public health* 2010 ; 7(2) : 546-564. DOI: https://doi.org/10.3390/ijerph7020546.
83. Goupil-Sormany I, Debia M, Glorennec P *et al*. *Environnement et santé publique*. Presses de l'EHESP, 2023.
84. National Research Council (NRC). Pesticides in the Diets of Infants and Children. *The National Academies Press*, 1993. 978-0-309-04875-0. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK236275/
85. Landrigan PJ, Etzel RA. *Textbook of Children's Environmental Health. Second edition*. Oxford University Press, 2024.
86. Etzel R, Balk S. Pediatric Environmental Health, 4th Edition. *American Academy of Pediatrics (AAP)*, 2018. https://publications.aap.org/aapbooks/book/524/Pediatric-Environmental-Health?autologincheck=redirected
87. Organisation mondiale de la santé (OMS). Children are not little adults. In: WHO training package for the health sector: children's health and the environment. 2019. https://www.who.int/publications/i/item/WHO-CED-PHE-EPE-19.12.07
88. Ministère chargé de la Santé, Commission des 1000 premiers jours. Les 1000 premiers jours. Là où tout commence. 2020. https://sante.gouv.fr/IMG/pdf/rapport-1000-premiers-jours.pdf
89. Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses). Les perturbateurs endocriniens. Comprendre où en est la recherche. *Les Cahiers de la Recherche N° 23 - Santé, Environnement, Travail*, 2024. https://www.anses.fr/fr/system/files/CDLR-mg-pe-23.pdf
90. Bonvallot N. *Perturbateurs endocriniens : Vers une meilleure prévention des expositions*. Presses de l'EHESP, 2024.

91. Endocrine Society. Endocrine-Disrupting Chemicals. Position Statement. 2025. https://www.endocrine.org/-/media/endocrine/files/advocacy/position-statement/position_statement_endocrine_disrupting_chemicals_2025.pdf
92. Grandjean P, Bellinger D, Bergman Å *et al*. The Faroes Statement: Human Health Effects of Developmental Exposure to Chemicals in Our Environment. *Basic & Clinical Pharmacology & Toxicology* 2008 ; 102(2) : 73-75. DOI: https://doi.org/10.1111/j.1742-7843.2007.00114.x.
93. Barouki R, Gluckman PD, Grandjean P *et al*. Developmental origins of non-communicable disease: Implications for research and public health. *Environmental Health* 2012 ; 11(1) : 42. DOI: https://doi.org/10.1186/1476-069X-11-42.
94. Kubota T, Fukuoka H. *Developmental origins of health and disease (DOHaD): from biological basis to clinical significance*. Springer, 2018.
95. Kishi R, Grandjean P. *Health Impacts of Developmental Exposure to Environmental Chemicals*. Springer, 2020.
96. Endocrine Society. Endocrine-Disrupting Chemicals in the European Union. An Endocrine Society Position Statement. 2018. https://www.endocrine.org/advocacy/position-statements/endocrine-disrupting-chemicals-in-the-european-union
97. Grandjean P. *Only One Chance: How Environmental Pollution Impairs Brain Development--and how to Protect the Brains of the Next Generation*. Oxford University Press, 2015.
98. Demeneix B. *Toxic Cocktail : How Chemical Pollution in Poisoning Our Brains*. Oxford University Press, 2017.
99. Caporale N, Leemans M, Birgersson L *et al*. From cohorts to molecules: Adverse impacts of endocrine disrupting mixtures. *Science* 2022 ; 375(6582) : eabe8244. DOI: https://doi.org/10.1126/science.abe8244.
100. Reed CE, Fenton SE. Exposure to diethylstilbestrol during sensitive life stages: a legacy of heritable health effects. *Birth Defects Research Part C: Embryo Today: Reviews* 2013 ; 99(2) : 134-146. DOI: https://doi.org/10.1002/bdrc.21035.
101. Pons JC, Papiernik E, Billon A *et al*. Hypospadias in sons of women exposed to diethylstilbestrol in utero. *Prenatal Diagnosis* 2005 ; 25(5) : 418-419. DOI: https://doi.org/10.1002/pd.1136.
102. Kah O. *Les Perturbateurs endocriniens*. Éditions Apogée, 2016.
103. Klip H, Verloop J, van Gool JD *et al*. Hypospadias in sons of women exposed to diethylstilbestrol in utero: a cohort study. *The Lancet* 2002 ; 359(9312) : 1102-1107. DOI: https://doi.org/10.1016/S0140-6736(02)08152-7
104. Slama R, Cordier S. Impact des facteurs environnementaux physiques et chimiques sur le déroulement et les issues de grossesse. *Journal de gynécologie obstétrique et biologie de la reproduction* 2013 ; 42(5) : 413-444. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jgyn.2013.02.012.
105. Wild CP. Complementing the genome with an “exposome”: the outstanding challenge of environmental exposure measurement in molecular epidemiology. *Cancer Epidemiology Biomarkers & Prevention* 2005 ; 14(8) : 1847-1850. DOI: https://doi.org/10.1158/1055-9965.EPI-05-0456.
106. Wild CP. The exposome: from concept to utility. *International journal of epidemiology* 2012 ; 41(1) : 24-32. DOI: https://doi.org/10.1093/ije/dyr236.
107. Barouki R. L’exposome, un concept holistique et utile. *Bulletin de l'Académie Nationale de Médecine* 2020 ; 204(3) : 299-305. DOI: https://doi.org/10.1016/j.banm.2019.11.015.
108. Commission européenne (CE). Communication de la Commission au Parlement européen, au Conseil, au Comité économique et social européen et au Comité des régions. Stratégie pour la durabilité dans le domaine des produits chimiques. Vers un environnement exempt de

substances toxiques. 2020. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/HTML/?uri=CELEX:52020DC0667
109. Ministère chargé de l'Écologie, Ministère chargé de la Santé. Quatrième Plan national santé-environnement (PNSE 4). Un environnement, une santé. 2021. https://sante.gouv.fr/sante-et-environnement/les-plans-nationaux-sante-environnement/article/plan-national-sante-environnement-4-pnse-4-un-environnement-une-sante-2021-2025
110. Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). Testing of chemicals. https://www.oecd.org/en/topics/testing-of-chemicals.html [Consulté le : 03/09/2025]
111. Chemical Abstracts Service (CAS). CAS REGISTRY®. https://www.cas.org/cas-data/cas-registry [Consulté le : 14/09/2025]
112. Slama R. *Le mal du dehors : L'influence de l'environnement sur la santé*. Éditions Quæ, 2017.
113. Commission européenne (CE). COMMUNICATION DE LA COMMISSION AU PARLEMENT EUROPÉEN, AU CONSEIL ET AU COMITÉ ÉCONOMIQUE ET SOCIAL EUROPÉEN. Rapport général de la Commission sur le fonctionnement du règlement REACH et révision de certains éléments. Conclusions and Actions. 2018. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:52018DC0116
114. Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques (OPECST). Évaluation des risques sanitaires et environnementaux par les agences : trouver le chemin de la confiance. 2019. https://www.senat.fr/notice-rapport/2018/r18-477-notice.html
115. Bundesinstitut für Risikobewertung (BFR). REACH compliance workshop at the BfR. BfR Communication No 030/2018 of 25 September 2018. 2018. https://www.bfr.bund.de/cm/349/reach-compliance-workshop-at-the-bfr.pdf
116. Cauchemez S, Cossu G, Delzenne N *et al*. Standing the test of COVID-19: charting the new frontiers of medicine. *Frontiers in Science* 2024 ; 2 : 1236919. DOI: https://doi.org/10.3389/fsci.2024.1236919.
117. European Environment Agency (EEA). The European Environment - State and Outlook 2020: Knowledge for Transition to a Sustainable Europe. 2019. https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/soer-2020
118. Thoenig J-C. 2019. Politique publique, dans *Dictionnaire des politiques publiques*. Presses de Sciences Po. p. 462-468.
119. Riedinger N, Arambourou H, Lambert A *et al*. Les politiques publiques de santé environnementale. Mieux connaître pour mieux agir. Rapport pour l'Assemblée nationale. *Haut-commissariat à la Stratégie et au Plan*, 2025. https://www.strategie-plan.gouv.fr/publications/les-politiques-publiques-de-sante-environnementale
120. Journal officiel de la République française (JORF) n°185 du 11 août 2004, 2024. LOI n° 2004-806 du 9 août 2004 relative à la politique de santé publique (1). NOR : SANX0300055L. https://www.legifrance.gouv.fr/eli/loi/2004/8/9/SANX0300055L/jo/texte.
121. Ministère chargé de l'Écologie. Le plan national santé environnement (PNSE) - Le groupe santé environnement, qu'est-ce que c'est ? https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/plan-national-sante-environnement-pnse [Consulté le : 05/08/2025]
122. Conseil général de l'environnement et du développement durable (CGEDD), Inspection générale des affaires sociales (IGAS), Inspection générale de l'administration de l'éducation nationale et de la recherche (IGAENR). Contribution à l'évaluation du 2ème Plan National Santé Environnement 2009-2013. 2013. https://side.developpement-

durable.gouv.fr/Default/doc/SYRACUSE/342136/contribution-a-l-evaluation-du-2eme-plan-national-sante-environnement-2009-2013-rapport-du-cgedd-n-0?_lg=fr-FR
123. Pipien G, Vindimian É. Évaluation du troisième plan national Santé-Environnement - Rapport n° 011997-01. *Conseil général de l'environnement et du développement durable (CGEDD)*, 2018. https://igedd.documentation.developpement-durable.gouv.fr/documents/Affaires-0010730/011997-01_rapport-publie.pdf
124. Groupe de travail d'évaluation globale des PNSE. Évaluation globale des Plans nationaux santé - environnement (2004-2019). *Haut Conseil de la santé publique (HCSP)*, 2022. https://www.hcsp.fr/Explore.cgi/AvisRapportsDomaine?clefr=1223
125. Commissariat général au développement durable (CGDD). Les indicateurs d'état du Plan national santé environnement 2004-2008. *Collection « Études et synthèses » du Service de l'économie, de l'évaluation et de l'intégration du développement durable (SEEIDD)*, 2008. https://side.developpement-durable.gouv.fr/CENT/doc/SYRACUSE/260190/vers-un-tableau-de-bord-de-la-sante-environnementale-en-france-les-indicateurs-d-etat-du-plan-nation?_lg=fr-FR
126. Toutut-Picard É, Josso S. Rapport fait au nom de la Commission d'enquête sur l'évaluation des politiques publiques de santé environnementale. 2020. https://www.assemblee-nationale.fr/dyn/15/rapports/cesanteenv/l15b3701-ti_rapport-enquete.pdf
127. Foucart S. 110 mesures, aucun effet : les ratés du plan santé environnement. *Le Monde (site Internet)*, 2019. https://www.lemonde.fr/planete/article/2019/07/08/le-dernier-plan-sante-environnement-n-a-eu-aucun-effet_5486708_3244.html
128. Commission des affaires sociales du Sénat, Jomier B, Lassarade F. Santé environnementale : une nouvelle ambition. Rapport sur les orientations et la gouvernance de la politique de santé environnementale. 2021. https://www.senat.fr/rap/r20-479/r20-479.html
129. Gnansia E. Santé-environnement: avec le PNSE4, l'Etat «repart encore de zéro». *Journal de l'Environnement*, 2020.
130. Santé publique France (SpF). Le programme national de biosurveillance. 2021. https://www.santepubliquefrance.fr/biosurveillance-humaine/le-programme-national-de-biosurveillance [Consulté le : 29/08/2025]
131. Santé publique France. Imprégnation de la population française par le cadmium. Programme national de biosurveillance, Esteban 2014-2016. 2021. https://www.santepubliquefrance.fr/docs/impregnation-de-la-population-francaise-par-le-cadmium.-programme-national-de-biosurveillance-esteban-2014-2016
132. Oleko A, Fillol C, Saoudi A *et al*. Imprégnation de la population française par les hydrocarbures aromatiques polycycliques. Programme national de biosurveillance, Esteban 2014-2016. *Santé publique France (SpF)*, 2023. https://www.santepubliquefrance.fr/determinants-de-sante/exposition-a-des-substances-chimiques/perturbateurs-endocriniens/documents/enquetes-etudes/impregnation-de-la-population-francaise-par-les-hydrocarbures-aromatiques-polycycliques.-programme-national-de-biosurveillance-esteban-2014-2016
133. Santé publique France (SpF). Imprégnation de la population française par les polychlorobiphenyles, dioxines et furanes. Programme national de biosurveillance, Esteban 2014-2016. 2021. https://www.santepubliquefrance.fr/determinants-de-sante/exposition-a-des-substances-chimiques/pesticides/documents/enquetes-etudes/impregnation-de-la-population-francaise-par-les-polychlorobiphenyles-dioxines-et-furanes.-programme-national-de-biosurveillance-esteban-2014-2016

134. Santé publique France (SpF). Imprégnation de la population française par les pesticides organophosphorés. Programme national de biosurveillance, Esteban 2014-2016. 2021. https://www.santepubliquefrance.fr/determinants-de-sante/exposition-a-des-substances-chimiques/pesticides/documents/enquetes-etudes/impregnation-de-la-population-francaise-par-les-pesticides-organophosphores.-programme-national-de-biosurveillance-esteban-2014-2016
135. Santé publique France. Imprégnation de la population française par les bisphénols A, S et F : Programme national de biosurveillance, Esteban 2014-2016. 2019. https://www.santepubliquefrance.fr/determinants-de-sante/exposition-a-des-substances-chimiques/perturbateurs-endocriniens/documents/rapport-synthese/impregnation-de-la-population-francaise-par-les-bisphenols-a-s-et-f-programme-national-de-biosurveillance-esteban-2014-2016
136. Santé publique France (SpF). Imprégnation de la population française par les retardateurs de flamme bromés : Programme national de biosurveillance, Esteban 2014-2016. 2019. https://www.santepubliquefrance.fr/determinants-de-sante/exposition-a-des-substances-chimiques/perturbateurs-endocriniens/documents/rapport-synthese/impregnation-de-la-population-francaise-par-les-retardateurs-de-flamme-bromes-programme-national-de-biosurveillance-esteban-2014-2016
137. Santé publique France (SpF). Imprégnation de la population française par les composés perfluorés : Programme national de biosurveillance, Esteban 2014-2016. 2019. https://www.santepubliquefrance.fr/determinants-de-sante/exposition-a-des-substances-chimiques/perturbateurs-endocriniens/documents/rapport-synthese/impregnation-de-la-population-francaise-par-les-composes-perfluores-programme-national-de-biosurveillance-esteban-2014-2016
138. Santé publique France (SpF). Imprégnation de la population française par les phtalates. Programme national de biosurveillance, Esteban 2014-2016. 2019. https://www.santepubliquefrance.fr/determinants-de-sante/exposition-a-des-substances-chimiques/perturbateurs-endocriniens/documents/rapport-synthese/impregnation-de-la-population-francaise-par-les-phtalates-programme-national-de-biosurveillance-esteban-2014-2016
139. Huc L, Barouki R. Réglementation des substances chimiques: science et décision, lenteur et confusion. 2021. https://www.annales.org/re/2021/resumes/octobre/18-re-resum-FR-AN-octobre-2021.html
140. Santé publique France. Imprégnation des femmes enceintes par les polluants de l'environnement en France en 2011 - Tome 3 : synthèse et conclusions. 2019. https://www.santepubliquefrance.fr/docs/impregnation-des-femmes-enceintes-par-les-polluants-de-l-environnement-en-france-en-2011-tome-3-synthese-et-conclusions
141. Coumoul X, Massicot F, Pairon JC *et al*. *Toxicologie, 2e édition*. Dunod, 2023.
142. Ruaux N. Les contaminants chimiques seuls ou en mélange - Comprendre où en est la recherche. Les Cahiers de la Recherche No 16 - Santé, Environnement, Travail. *Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses)*, 2021. anses-03207811. https://anses.hal.science/anses-03207811v1/file/CDLR_16_contaminants_seuls_ou_en_melange.pdf
143. Institut national de la santé et de la recherche médicale (Inserm). Expertise collective Inserm. Pesticides et effets sur la santé : nouvelles données. 2021. https://www.inserm.fr/expertise-collective/pesticides-et-sante-nouvelles-donnees-2021/

144. Institut national de prévention et d'éducation pour la santé (INPES - aujourd'hui Santé publique France), Ministère chargé de la Santé. Guide de la pollution de l'air intérieur. 2009. https://sante.gouv.fr/IMG/pdf/guide_inpes_pollution_de_l_air_interieur.pdf
145. Ministère chargé de l'Écologie. Étiquetage des produits de construction. 2020. https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/etiquetage-produits-construction [Consulté le : 29/08/2025]
146. Agence Française de Sécurité Sanitaire, de l'Environnement et du Travail (Afsset), aujourd'hui Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses). Procédure de qualification des émissions de composés organiques volatils par les matériaux de construction et produits de décoration - Comité d'experts spécialisés « Évaluation des risques liés aux milieux aériens » - Groupe de travail « Composés organiques volatils ». 2009. https://www.anses.fr/fr/content/emissions-de-composes-organiques-volatils-cov-par-les-produits-de-construction-et-de
147. Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses). Expertise en appui à l'étiquetage des produits d'ameublement. Avis de l'Anses et Rapport d'expertise collective. 2015. https://www.anses.fr/fr/system/files/AIR2013sa0040Ra.pdf
148. Ministère chargé de l'Écologie. Plateforme public-privé pour la pré-validation de méthodes de caractérisation des PE : Contexte et genèse du projet. 2019. https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/documents/5_Pr%C3%A9sentation%20PEPPER_octobre%202019.pdf
149. United Nations Environment Programme (UNEP). Global Chemicals Outlook II - From Legacies to Innovative Solutions: Implementing the 2030 Agenda for Sustainable Development. 2019. https://www.unep.org/topics/chemicals-and-pollution-action/chemicals-management/global-chemicals-outlook
150. United Nations Environment Programme (UNEP). Global Chemicals Outlook - Towards Sound Management of Chemicals. 2013. https://www.unep.org/resources/report/global-chemicals-outlook-towards-sound-management-chemicals
151. Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris). Évaluation des risques sanitaires dans les études d'impact des ICPE - substances chimiques. 2003. https://sante.gouv.fr/IMG/pdf/Evaluation_des_risques_sanitaires_dans_les_etudes_d_impact_des_installations_classees_-_Risques_dus_aux_substances_chimiques.pdf
152. Bonnard R. Le risque biologique et la méthode d'évaluation du risque. *Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris)*, 2001. https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/risques_bio.pdf
153. National Research Council (NRC) - Committee on the institutional means for assessment of risks to public health. Risk assessment in the Federal government: managing the process. *The National Academies Press*, 1983. https://nap.nationalacademies.org/catalog/366/risk-assessment-in-the-federal-government-managing-the-process
154. National Research Council - Committee on Improving Risk Analysis Approaches Used by the U.S. EPA - Board on Environmental Studies and Toxicology - Division on Earth and Life Studies. Science and Decisions: Advancing Risk Assessment. *The National Academies Press*, 2009. https://nap.nationalacademies.org/catalog/12209/science-and-decisions-advancing-risk-assessment
155. Trantallidi M, Dimitroulopoulou C, Wolkoff P *et al*. EPHECT III: Health risk assessment of exposure to household consumer products. *Science of the Total Environment* 2015 ; 536 : 903-913. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.05.123.

156. Bonnard R. Méthodologie d'évaluation détaillée des risques liés aux sols pollués. Évaluation détaillée des risques pour la santé - version finale. *Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris)*, 2000.
157. Institut de veille sanitaire (InVS) - aujourd'hui intégré à Santé publique France (SpF). Guide pour l'analyse du volet sanitaire des études d'impact. 2000. https://www.santepubliquefrance.fr/docs/guide-pour-l-analyse-du-volet-sanitaire-des-etudes-d-impact
158. Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (Cerema). Guide méthodologique sur le volet « air et santé » des études d'impact routières. 2019. https://dtrf.cerema.fr/pdf/pj/Dtrf/0007/Dtrf-0007884/DT8023.pdf?openerPage=notice
159. Bard D. Principes de l'évaluation des risques pour la santé publique liés aux expositions environnementales. *Rev. épidémiol. santé publique* 1995 ; 43 : 423-431. DOI.
160. Boudia S, Demortain D. La production d'un instrument générique de gouvernement. *Gouvernement et action publique* 2014 ; (3) : 33-53. DOI: https://doi.org/10.3917/gap.143.0033.
161. Parlement européen, Conseil de l'Union européenne. Règlement (CE) n°1907/2006 du Parlement européen et du Conseil du 18 décembre 2006 concernant l'enregistrement, l'évaluation et l'autorisation des substances chimiques, ainsi que les restrictions applicables à ces substances (REACH). 2006. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:02006R1907-20140410
162. Ministères chargés de l'Écologie et de la Santé. Circulaire du 9 août 2013 relative à la démarche de prévention et de gestion des risques sanitaires des installations classées soumises à autorisation. NOR : DEVP1311673C. 2013. https://www.bulletin-officiel.developpement-durable.gouv.fr/documents/Bulletinofficiel-0027086/met_20130016_0100_0010.pdf
163. Ministère chargé de l'Écologie. Schéma conceptuel et modèle de fonctionnement. 2007. https://ssp-infoterre.brgm.fr/sites/default/files/documents/2022-05/schema_conceptuel.pdf
164. Ministère chargé de la Santé, Ministère chargé de l'Écologie, 2014. Note d'information n° DGS/EA1/DGPR/2014/307 du 31 octobre 2014 relative aux modalités de sélection des substances chimiques et de choix des valeurs toxicologiques de référence pour mener les évaluations des risques sanitaires dans le cadre des études d'impact et de la gestion des sites et sols pollués. https://www.legifrance.gouv.fr/circulaire/id/38905.
165. Glossaire de la promotion de la santé. *Organisation mondiale de la santé (OMS)*, 1998. https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/67245/WHO_HPR_HEP_98.1_fre.pdf
166. Prüss-Üstün A, Wolf J, Corvalán C *et al*. *Preventing disease through healthy environments: a global assessment of the burden of disease from environmental risks*. World Health Organization, 2016.
167. Jégou B. Le paradigme de l'exposome: définition, contexte et perspective. *Médecine/sciences* 2020 ; 36(11) : 959-960. DOI: https://doi.org/10.1051/medsci/2020230.
168. Le-Gall AC, Brignon J-M, Rouil L. Panorama des méthodes d'analyse multicritère comme outils d'aide à la décision. *Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris)*, 2009. Ineris-DRC-09-102861-12257A. https://www.ineris.fr/sites/default/files/contribution/Documents/le-gall-2009-drc-09-102861-12257a-mcda-action-18a-1352824541.pdf
169. Roy B, Bouyssou D. *Aide multicritère à la décision: méthodes et cas*. Economica Paris, 1993.

170. Stirling A. Keep it complex. *Nature* 2010 ; 468 : 1029. DOI: https://doi.org/10.1038/4681029a.
171. Karr G, Boudet C, Le-Gall AC *et al*. Aide au choix de substances prioritaires en santé environnementale : un processus associant un avis d'expert et une analyse multicritère participative. *Environnement, Risques & Santé* 2014 ; 13(2) : 135-143. DOI: https://doi.org/10.1684/ers.2014.0686.
172. Karr G, Pecassou B, Boudet C *et al*. Aide au choix des substances prioritaires du futur Plan national santé environnement (PNSE 3) : élaboration et mise en œuvre d'un indicateur de risque collectif. *Environnement, Risques & Santé* 2014 ; 13(3) : 232-243. DOI: https://doi.org/10.1684/ers.2014.0705.
173. Rencontres scientifiques Colas - La Recherche. Santé & Environnement. Sur quelles substances agir en priorité ? *La Recherche – Mai 2014 – N° 487*, 2014.
174. Fabrégat S. PNSE 3 : un outil pour hiérarchiser les substances toxiques préoccupantes. *Site Internet Actu-Environnement*, 2013. https://www.actu-environnement.com/ae/news/pnse-substances-prioritaires-hierarchisation-ineris-17661.php4
175. Bisson M. Choix de valeurs toxicologiques de référence (VTR) - Méthodologie appliquée par l'INERIS. *Institut national de l'environnement industriel et des risques (INERIS)*, 2016. https://www.ineris.fr/sites/default/files/contribution/Documents/drc-16-156196-11306a-1494926651.pdf
176. Demeneix B, Slama R. Endocrine Disruptors: From Scientific Evidence to Human Health Protection. 2019. https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2019/608866/IPOL_STU(2019)608866_EN.pdf
177. Colborn T, Dumanoski D, Myers JP. *L'homme en voie de disparition*. Terre Vivante, 1997.
178. European Commission (EC). Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European economic and social committee and the Committee of the regions. Chemicals Strategy for Sustainability - Towards a Toxic-Free Environment. 2020. COM(2020) 667 final. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:52020DC0667
179. Merton RK. The Matthew effect in science: The reward and communication systems of science are considered. *Science* 1968 ; 159(3810) : 56-63. http://www.jstor.org/stable/1723414. DOI.
180. Grandjean P, Eriksen ML, Ellegaard O *et al*. The Matthew effect in environmental science publication: a bibliometric analysis of chemical substances in journal articles. *Environmental Health* 2011 ; 10(1) : 96. DOI: https://doi.org/10.1186/1476-069X-10-96.
181. Jas N. Millefeuilles institutionnels et production d'ignorance dans le «gouvernement» des substances chimiques dangereuses. *Raison présente* 2017 ; 204(4) : 43-52. DOI: https://doi.org/10.3917/rpre.204.0043.
182. Harremoës P, Gee D, MacGarvin M *et al*. Late lessons from early warnings: science, precaution, innovation. *European Environment Agency (EEA)*, 2013. https://www.eea.europa.eu/publications/late-lessons-2
183. Agence Européenne Environnement (AEE). Signaux précoces et leçons tardives - Le principe de précaution 1896 - 2000. *Institut français de l'environnement (Ifen)*, 2004. https://www.eea.europa.eu/fr/publications/environmental_issue_report_2001_22
184. Bonvallot N, Brimo S, Salles B *et al*. Pour une gestion alerte du risque chimique - Risques (éco)toxicologiques pour les êtres humains et l'environnement dans une logique de

biodiversité. Expertise collective. Rapport final. 2021. https://www.alerte-sante-environnement-deontologie.fr/IMG/pdf/211020_cndaspe_gt_risque_chimique_rapport.pdf
185. Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses). Qualité de l'air intérieur. 2017. https://www.anses.fr/fr/content/qualite-de-lair-interieur-1 [Consulté le : 26/07/2025]
186. Ribéron J, O'Kelly P. MARIA: an experimental tool at the service of indoor air quality in housing sector. *Proceedings of the 9th International Conference on Indoor Air Quality and Climate - Indoor Air 2002*, 2002. https://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB7078.pdf
187. Nicolas M, Chiappini L, D'Anna B. Activités domestiques et qualité de l'air intérieur : émissions, réactivité et produits secondaires (Projet ADOQ). *CTSB-INERIS-IRCELYON*, 2013. https://www.cstb.fr/getmedia/05279ab5-905f-42c4-8fbb-e68eb0ba397e/synthese-adoq.pdf
188. TNS Sofres. Pollution intérieure - Utilisation des bougies et encens. Réf. 48UE91. Disponible en annexe du rapport Karr G, Ismert M, Ramel M. Utilisation d'encens et qualité de l'air intérieur : enjeux sanitaires, substances d'intérêt, bonnes pratiques. Rapport Réf. INERIS-DRC-14-144018-06268C. 2015. *Ministère en charge de l'environnement*, 2014. https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/Rapport-Ineris-DRC-14-144018-06268c-encens-vc-1455890922_0.pdf
189. Karr G. Débat INERIS - Société civile. Qualité de l'air intérieur : les enjeux sanitaires liés à l'utilisation de produits de consommation. *Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris)*, 2016. https://www.ineris.fr/sites/default/files/contribution/Documents/crr-conso-2016-v3-1467020548.pdf
190. Ministère chargé de l'Écologie. Utilisation d'encens : précautions d'usage. *Site internet du ministère chargé de l'Écologie (https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/qualite-lair-interieur). Contenu non disponible aujourd'hui mais repris dans l'Évaluation globale des Plans nationaux santé - environnement (2004-2019) du Haut Conseil de la santé publique (HCSP), 2022*, 2016. https://www.hcsp.fr/Explore.cgi/AvisRapportsDomaine?clefr=1223
191. Agence de la transition écologique (ADEME). Etudes sur les produits ménagers et désodorisants et la qualité de l'air intérieur : les produits dits « naturels » ou « assainissant » également à utiliser avec précaution. Communiqué de Presse du 14 octobre 2021. 2021. https://www.ademe.fr/presse/communique-national/etudes-sur-les-produits-menagers-et-desodorisants-et-la-qualite-de-lair-interieur-les-produits-dits-naturels-ou-assainissants-egalement-a-utiliser-avec-precautio/ [Consulté le : 01/09/2025]
192. Agence de la transition écologique (ADEME). Au quotidien - un air sain chez soi. 2019.
193. Agence de la transition écologique (ADEME). Moins de produits toxiques. Des conseils pour s'en passer à la maison et au jardin. 2019.
194. Catalogue Ineris Formation. Formation RC15 Qualité de l'air intérieur : mieux connaître les expositions et les risques pour accompagner les enjeux réglementaires. Effets des substances et agents sur la santé et l'environnement. *Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris)*, 2019.
195. Zadeh LA. Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility. *Fuzzy sets and systems* 1978 ; 1(1) : 3-28. DOI.
196. Dubois D, Prade H. *Possibility Theory: An Approach to Computerized Processing of Uncertainty*. Springer US, 2012.
197. Grammont V, Mandin C, Ramel M. Données disponibles relatives aux émissions des produits de consommation courante dans l'environnement intérieur. Rapport réf. INERIS-DRC-09-104121-01494B. *Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris)*, 2009.

198. Larbre J, Boudet C, Ramel M. Rapport préliminaire en vue de l'étiquetage des produits de grande consommation - Classement en fonction des expositions dans l'air intérieur. Rapport INERIS réf. INERIS-DRC-10-109458-04047B. *Institut national de l'environnement industriel et des risques (INERIS)*, 2011. https://www.ineris.fr/sites/default/files/contribution/Documents/drc-10-109458-04047b-rap-meeddm-1391677503.pdf
199. Larbre J, Boudet C, Ramel M. Deuxième rapport préliminaire en vue de l'étiquetage des produits de grande consommation Classement des bougies et des encens en fonction des émissions de composés organiques volatils et de particules dans l'air intérieur. Rapport INERIS réf. INERIS-DRC-11-115731-06669B. *Institut national de l'environnement industriel et des risques (INERIS)*, 2011. https://www.ineris.fr/sites/default/files/contribution/Documents/rapport-produits-conso-bougies-encens-vfinale-2012-1382543000.pdf
200. Observatoire de la qualité des environnements intérieurs (OQEI). Une mission d'intérêt général au service de la santé et du bien-être de tous. https://www.oqei.fr/fr/observatoire-qei [Consulté le : 14/02/2026]
201. Pelletier M, Glorennec P, Mandin C *et al*. Chemical-by-chemical and cumulative risk assessment of residential indoor exposure to semivolatile organic compounds in France. *Environment international* 2018 ; 117 : 22-32. DOI: https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.04.024.
202. Glorennec P, Mandin C, Mercier F *et al*. Expositions et risques sanitaires liés aux composés organiques semi-volatils dans l'habitat. Synthèse du programme de recherche ECOS-Habitat. *Environnement, Risques & Santé* 2019 ; 18(5) : 380-391. DOI: https://doi.org/10.1684/ers.2019.1342.
203. Observatoire de la qualité de l'air intérieur (OQAI). Premier état de la contamination des logements français en composés organiques semi-volatils : pesticides, phtalates, retardateurs de flamme, etc. Bulletin de l'OQAI n°9. 2015. https://leres.ehesp.fr/wp-content/uploads/2015/07/490_Bulletin_OQAI9_COSV.pdf
204. Karthikeyan BS, Ravichandran J, Mohanraj K *et al*. A curated knowledgebase on endocrine disrupting chemicals and their biological systems-level perturbations. *Science of the Total Environment* 2019 ; 692 : 281-296. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.225.
205. Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses). Élaboration d'une liste de substances chimiques d'intérêt en raison de leur activité endocrine potentielle - Méthode d'identification et stratégie de priorisation pour l'évaluation Contribution à la Stratégie nationale sur les perturbateurs endocriniens 2019-2022. 2021. https://www.anses.fr/system/files/REACH2019SA0179Ra-1.pdf
206. Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses). Proposition de valeurs guides de qualité d'air intérieur - Méthode d'élaboration de valeurs guides de qualité d'air intérieur - Avis de l'Anses - Rapport d'expertise collective. 2016.
207. European Commission. EU-LCI subgroup. https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/construction/eu-lci-subgroup_en [Consulté le : 30/08/2025]
208. European Commission (EC). Agreed EU-LCI values – substances with their established EU-LCI values and summary fact sheets. 2021. https://ec.europa.eu/docsroom/documents/44905
209. Institute for Health Consumer Protection (Joint Research Centre). Harmonisation framework for health based evaluation of indoor emissions from construction products in the European Union using the EU-LCI concept. *Publications Office of the European Union*, 2013.

https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/d3d78842-bc95-4984-a2fe-2317731324bd
210. European Commission (EC). EU-LCI value facts and information document. 2018. https://ec.europa.eu/docsroom/documents/30841/attachments/6/translations/en/renditions/native
211. German Committee on Indoor Air Guide Values (AIR). Indoor Air Guide values I and II. 2022. https://www.umweltbundesamt.de/en/topics/health/commissions-working-groups/german-committee-on-indoor-air-guide-values#german-committee-on-indoor-air-guide-values-air 24/04/2018 [Consulté le : 17/02/2023]
212. DeVito M, Bokkers B, van Duursen MB *et al*. The 2022 world health organization reevaluation of human and mammalian toxic equivalency factors for polychlorinated dioxins, dibenzofurans and biphenyls. *Regulatory Toxicology and Pharmacology* 2024 ; 146 : 105525. DOI: https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2023.105525.
213. Martin O, Scholze M, Ermler S *et al*. Ten years of research on synergisms and antagonisms in chemical mixtures: A systematic review and quantitative reappraisal of mixture studies. *Environment international* 2021 ; 146 : 106206. DOI: https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106206.
214. Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses). Valeurs toxicologiques de référence. Méthode pour un mélange de substances et application au mélange benzène, toluène, éthylbenzène et xylènes. Avis de l'Anses. Rapport d'expertise collective. 2022. https://www.anses.fr/system/files/VSR2018SA0152Ra-1.pdf
215. Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses). Valeurs guides de qualité d'air intérieur - Étude de cas pour un mélange de substances irritantes. 2022. https://www.anses.fr/fr/system/files/VSR2016SA0101Ra-1.pdf
216. Inspection générale des affaires sociales (IGAS). La santé-environnement dans les travaux de l'Igas - Rapport de capitalisation (2013-2022). 2023. https://igas.gouv.fr/nos-rapports/sante/La-sante-environnement-dans-les-travaux-de-l-Igas-de-2013-a-2022
217. Journal officiel de la République française n°0110 du 11 mai 2017. Décret n° 2017-946 du 10 mai 2017 relatif à l'étiquetage des produits désodorisants à combustion sur les informations de sécurité pour l'utilisateur. https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000034674812
218. Journal Officiel de la République Française n°0124 du 30 mai 2009, 2009. Arrêté du 28 mai 2009 modifiant l'arrêté du 30 avril 2009 relatif aux conditions de mise sur le marché des produits de construction et de décoration contenant des substances cancérigènes, mutagènes ou reprotoxiques de catégorie 1 ou 2. https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/LEGITEXT000020679250.
219. Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses). Évaluation des risques sanitaires des substances reprotoxiques et/ou perturbatrices endocriniennes dans les produits de consommation : le méthyl tert-butyl éther (MTBE) (n° CAS 1634-04-4). Avis de l'Anses. Rapport d'expertise collective. 2014. https://www.anses.fr/system/files/CHIM2009sa0331Ra-05.pdf
220. Sénat. Rapport de la Commission d'enquête sur le coût économique et financier de la pollution de l'air. 2015. http://www.senat.fr/rap/r14-610-1/r14-610-11.pdf
221. Caudeville J, Bonnard R, Boudet C *et al*. Development of a spatial stochastic multimedia exposure model to assess population exposure at a regional scale. *Science of The Total Environment* 2012 ; 432 : 297-308. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.06.001.

222. Institut National de Recherche et de Sécurité pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles (INRS). Principes généraux de la démarche de prévention. https://www.inrs.fr/demarche/principes-generaux/Principes-generaux-prevention.html [Consulté le : 02/09/2025]
223. Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris). Surveillance dans l'air autour des installations classées. Retombées des émissions atmosphériques. Impact des activités humaines sur les milieux. 2021. Ineris-201065-2172207-v1.0. https://www.ineris.fr/fr/surveillance-air-autour-installations-classees-retombees-emissions-atmospheriques-impacts-activites
224. Catalogue Ineris Formation. Formation RC01 Prévention et gestion des risques sanitaires chroniques. Évaluation et prévention des impacts des émissions industrielles. *Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris)*, 2025. https://www.ineris.fr/sites/default/files/contribution/Documents/20250107%20-%20Ineris%20formation%20-%20Catalogue%20-%20WEB.pdf
225. Grammont V, Boudet C, Ramel M *et al*. Évaluation de l'état des milieux et des risques sanitaires. Démarche intégrée pour la gestion des émissions de substances chimiques par les installations classées. Impact des activités humaines sur les milieux et la santé. *Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris)*, 2013. DRC-12-125929-13162B. https://sante.gouv.fr/IMG/pdf/drc-guide-ers-2013-v4d-complet-lienscompact-1378197912.pdf
226. European Parliament, Council of the European Union, 2010. Directive 2010/75/EU of the European Parliament and of the Council of 24 November 2010 on industrial emissions (integrated pollution prevention and control) (recast) (Text with EEA relevance). https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2010/75/oj.
227. Site Internet AIDA de l'Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris). BREF - document de référence sur les meilleures techniques disponibles. https://aida.ineris.fr/guides/documents-bref [Consulté le : 30/08/2025]
228. Site Internet AIDA de l'Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris). Documents BREF et conclusions MTD. https://aida.ineris.fr/guides/documents-bref/documents-bref-conclusions-mtd [Consulté le : 30/08/2025]
229. Official Journal of the European Union, 2024. Commission Implementing Decision (EU) 2024/2974 of 29 November 2024 establishing the best available techniques (BAT) conclusions, under Directive 2010/75/EU of the European Parliament and of the Council on industrial emissions, for the smitheries and foundries industry (notified under document C(2024) 8322) (Text with EEA relevance). https://aida.ineris.fr/sites/aida/files/documents-bref/OJ_L_202402974_EN_TXT_0.pdf.
230. Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris). Portail Substances Chimiques (PSC). https://substances.ineris.fr/ [Consulté le : 30/08/2025]
231. Lemaire L, Michel-Malfait J, Lethielleux L *et al*. Synthèse des valeurs réglementaires de gestion en vigueur pour les substances chimiques, dans l'eau, les denrées alimentaires et dans l'air en France au 01 mars 2025. *Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris)*, 2025. https://www.ineris.fr/fr/synthese-valeurs-reglementaires-gestion-vigueur-substances-chimiques-eau-denrees-alimentaires-air
232. Site Internet InfoTerre Sites et sols pollués du Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM). L'interprétation de l'état des milieux - Description - Grille de calcul. https://ssp-infoterre.brgm.fr/fr/methodologie/iem [Consulté le : 30/08/2025]

233. Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris). Transfer parameters for polychlorinated dibenzodioxins, polychlorinated dibenzofurans and polychlorinated biphenyls, used for exposure assessment: Application in the MODUL'ERS software [Paramètres de transfert des polychlorodibenzodioxines, polychlorodibenzofurannes et des polychlorobiphényles, utilisés pour l'évaluation de l'exposition : Application dans le logiciel MODUL'ERS]. 2017. INERIS-DRC-16-159776-09593A. https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/rapport-ineris-drc-16-159776-09593a-pcb-pcddf9-fl-rbn-1502451900.pdf
234. Bonnard R, Caudeville J. *Modul'ERS : a modular computational tool for human health risk assessment*. à *24th Annual Meeting of the International Society of Exposure Science (ISES 2014)*. 2014. Cincinnati, United States.
235. Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris). Sets of equations for modeling exposure linked to soil contamination or emissions from an industrial facility. 2010. DRC-14-141968-04378A. https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/Institut%20nation-2010-Sets%20of%20equations%20for%20mod.pdf
236. Working Party on Exposure Assessment (WPEA). Report from the Survey of Exposure Assessment Models Used in a Regulatory Context. *Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD)*, 2023. ENV/CBC/WRPR(2023)55.
237. Bokova I. L'économie verte : vous inclut-elle ? *Organisation des Nations unies pour l'éducation, la science et la culture (UNESCO)*, 2012. https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000216499_fre
238. Meyer-Grandbastien A, Vajou B, Fromage B *et al*. Effets bénéfiques des espaces de nature en ville sur la santé : Synthèse des recherches internationales et clés de compréhension. Plante & Cité. 2021. https://www.citeverte.com/fileadmin/Citeverte_Ressources/PDF/Publication_Synthese-recherches-nature-et-sante.pdf
239. Nguyen P-Y, Astell-Burt T, Rahimi-Ardabili H *et al*. Green space quality and health: a systematic review. *International journal of environmental research and public health* 2021 ; 18(21) : 11028. DOI: https://doi.org/10.3390/ijerph182111028.
240. Reyes-Riveros R, Altamirano A, De La Barrera F *et al*. Linking public urban green spaces and human well-being: A systematic review. *Urban Forestry & Urban Greening* 2021 ; 61 : 127105. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127105.
241. Benzaghta MA, Elwalda A, Mousa MM *et al*. SWOT analysis applications: An integrative literature review. *Journal of Global Business Insights* 2021 ; 6(1) : 54-72. DOI: https://doi.org/10.5038/2640-6489.6.1.1148.
242. Gayet G, Baptist F, Maciejewski L *et al*. Guide de détermination des habitats terrestres et marins de la typologie Eunis. *Agence française pour la biodiversité*, 2018. https://www.natura2000.fr/documentation/references-bibliographiques/guide-determination-habitats-terrestres-marins-typologie
243. Jaunatre R. Dynamique et restauration d'une steppe méditerranéenne après changements d'usages (La Crau, Bouches-du-Rhône, France) - Thèse. Université d'Avignon. 2012. https://theses.hal.science/tel-00862398/document.
244. Gallet S. Génie écologique, Ingénierie écologique, Restauration écologique, … De quoi parle-t-on ? *Colloque Génie écologique et ingénierie écologique - 14-15/11/2024*, 2024. https://documents.lesentreprisesdupaysage.fr/pub/documents/Presentation-colloque-unep-2024.pptx

245. Corvalan C, Hales S, McMichael A. Ecosystems and human well-being. Health synthesis: a report of the Millennium Ecosystem Assessment. *World Health Organization*, 2005. 9241563095. https://iris.who.int/handle/10665/43354
246. Karr G, Bert V. Usage de renaturation dans la gestion des sites et sols pollués : premiers éléments de méthodologie. *YearBook Santé et Environnement*, 2024. https://www.jle.com/en/e-docs/synthese_usage_de_renaturation_dans_la_gestion_des_sites_et_sols_pollues_premiers_elements_de_methodologie_351941/yb_synthese.phtml
247. Direction générale de la Prévention des Risques (DGPR) - Bureau du Sol et du Sous-Sol. Introduction à la méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués. *Ministère chargé de l'Écologie*, 2017. https://ssp-infoterre.brgm.fr/sites/default/files/documents/2022-02/intro_methodo_ssp_2017.pdf
248. Génot J-C, Schnitzler A. *La France des friches : De la ruralité à la féralité*. Éditions Quæ, 2012.
249. Muratet A. Cycle de webinaires « La renaturation en Île-de-France ». Renaturation des friches. Les friches urbaines, des réservoirs de biodiversité, des refuges d'humanité. 2023. https://www.youtube.com/watch?v=jv-6hr8iLi8&list=PLgtWr6Jr2_-rfyFzw0zUmxsNfVS4Mh1oD&index=4 [Consulté le : 30/08/2025]
250. Gauthier C. Contribution de la compensation écologique à un modèle économique de renaturation des friches urbaines et périurbaines. *Humanité et Biodiversité*, 2018. https://webissimo-ide.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/etude_friches_et_compensation_urbaines-web_cle77c96c.pdf
251. Shwartz A. Les interactions entre la biodiversité et les citadins au cœur d'une métropole. *Muséum national d'histoire naturelle (MNHN)*, 2012. http://www.theses.fr/2012MNHN0005
252. Pucheux N, Andres S, Thybaud E. Document d'orientation pour l'évaluation du risque chimique pour les écosystèmes. *Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris)*, 2022. https://www.ineris.fr/fr/document-orientation-evaluation-risque-chimique-ecosystemes
253. Nicolas Pucheux (INERIS), Nicolas Manier (INERIS), Olivier Faure (Ecole des Mines de Saint-Etienne, UMR 5600 EVS). Étude TIPOMO, Étude des Transferts, Indices de Préoccupation : Outils pour la valorisation des friches urbaines MOyennement contaminées. *Agence de la transition écologique (ADEME)*, 2022. https://librairie.ademe.fr/sols-pollues/5799-identification-de-friches-polluees-eligibles-a-une-reconversion-ecologique.html
254. Pucheux N. Indice de préoccupation (IDP) - Outil d'aide à la gestion pour identifier les friches polluées éligibles à une reconversion écologique. *Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris)*, 2023. https://www.ineris.fr/fr/indice-preoccupation-idp
255. Banzo M. L'espace ouvert pour une nouvelle urbanité. Université Michel de Montaigne-Bordeaux III. 2009. https://theses.hal.science/tel-00618968/file/Espace_ouvert_nouvelle_urbanite_BANZO_HDR.pdf.
256. Laille P, Provendier D, Colson F *et al*. Les bienfaits du végétal en ville - Synthèse des travaux scientifiques et méthode d'analyse. *Plante & Cité*, 2013. https://www.plante-et-cite.fr/projet/fiche/32/beneveg_les_bienfaits_du_vegetal_en_ville/n:25
257. Murad MH, Asi N, Alsawas M *et al*. New evidence pyramid. *BMJ Evidence-Based Medicine* 2016 ; 21(4) : 125-127. DOI: https://doi.org/10.1136/ebmed-2016-110401.
258. Agence nationale de la recherche (ANR), Centre national de la recherche scientifique (CNRS), Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (INRAE) *et al*. Charte française de déontologie des métiers de la recherche. 2015.

https://www.alerte-sante-environnement-deontologie.fr/IMG/pdf/charte-nationale-deontologie.pdf
259. Decision of the Executive Director of the European Food Safety Authority on Competing Interest Management. *European Food Safety Authority (EFSA)*, 2018. https://www.efsa.europa.eu/sites/default/files/corporate_publications/files/competing_interest_management_17.pdf
260. Journal officiel de la République française (JORF) n°0116 du 22 mai 2013, 2013. Décret n° 2013-413 du 21 mai 2013 portant approbation de la charte de l'expertise sanitaire prévue à l'article L. 1452-2 du code de la santé publique. https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000027434015.
261. Lavarde P, Bartoli F, Lesteven P *et al*. La stratégie nationale sur les perturbateurs endocriniens (SNPE) - Evaluation de la mise en oeuvre et propositions d'évolution. *Conseil général de l'environnement et du développement durable (CGEDD), Inspection générale des affaires sociales (IGAS), Conseil général de l'alimentation, de l'agriculture et des espaces ruraux (CGAAER)*, 2017. https://igas.gouv.fr/La-strategie-nationale-sur-les-perturbateurs-endocriniens-evaluation-de-la-mise
262. European Chemicals Agency (ECHA). OECD and EU test guidelines. https://www.echa.europa.eu/support/oecd-eu-test-guidelines [Consulté le : 30/08/2025]
263. Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). Guidelines for the Testing of Chemicals. https://www.oecd.org/en/topics/sub-issues/testing-of-chemicals/test-guidelines.html [Consulté le : 30/08/2025]
264. Lexchin J, O'Donovan O. Prohibiting or 'managing'conflict of interest? A review of policies and procedures in three European drug regulation agencies. *Social science & medicine* 2010 ; 70(5) : 643-647. DOI: https://doi.org/10.1016/j.socscimed.2009.09.002.
265. Birchall C. 'Data.gov-in-a-box':Delimiting transparency. *European Journal of Social Theory* 2015 ; 18(2) : 185-202. DOI: https://doi.org/10.1177/1368431014555259.
266. Jasanoff S. *The fifth branch: science advisers as policymakers*. Harvard University Press, 1990.
267. Boudia S, Jas N. *Powerless science?: Science and politics in a toxic world*. Berghahn Books, 2014.
268. Woodruff TJ, Rayasam SDG, Axelrad DA *et al*. A science-based agenda for health-protective chemical assessments and decisions: overview and consensus statement. *Environmental Health* 2023 ; 21(1) : 132. DOI: https://doi.org/10.1186/s12940-022-00930-3.
269. Grandjean P, Ozonoff D. Transparency and translation of science in a modern world. *Environmental Health* 2013 ; 12(1) : 70. DOI: https://doi.org/10.1186/1476-069X-12-70.
270. Frickel S, Moore K. *The New Political Sociology of Science: Institutions, Networks, and Power*. University of Wisconsin Press, 2006.
271. Goldberg RF, Vandenberg LN. The science of spin: targeted strategies to manufacture doubt with detrimental effects on environmental and public health. *Environmental Health* 2021 ; 20(1) : 1-11. DOI: https://doi.org/10.1186/s12940-021-00723-0.
272. Oreskes N, Conway EM. *Merchants of doubt: How a handful of scientists obscured the truth on issues from tobacco smoke to global warming*. Bloomsbury Publishing USA, 2011.
273. Journal officiel de la République française (JORF) n°0238 du 14 octobre 2014, 2014. Loi n°2014-1170 du 13 octobre 2014, dite loi d'avenir pour l'agriculture, l'alimentation et la forêt. https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000029573022.
274. Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses). L'Anses et l'autorisation des produits phytopharmaceutiques en 20 questions. 2025.

https://www.anses.fr/fr/content/l-Anses-et-l-autorisation-des-produits-phytopharmaceutiques-en-20-questions [Consulté le : 25/08/2025]
275. Comité de déontologie et de prévention des conflits d'intérêts (CDPCI). Synthèse des travaux du Comité de déontologie et de prévention des conflits d'intérêts de l'Anses. 9 mars 2011 - 9 mars 2016. 2016. https://www.anses.fr/system/files/CODEON-Synthese2011-2016.pdf
276. United Nations Environment Program (UNEP). The environment is fundamental to human health. Here's why. 2024. https://www.unep.org/news-and-stories/story/environment-fundamental-human-health-heres-why [Consulté le : 05/11/2025]
277. Beck U. *La société du risque: sur la voie d'une autre modernité*. Flammarion - Champs essais, 2001 (édition originale : 1986).
278. International Risk Governance Council (IRGC). 2008. White Paper on Risk Governance: Toward an Integrative Framework, dans *Global Risk Governance: Concept and Practice Using the IRGC Framework*, Renn O.,Walker K.D., Editors. Springer Netherlands: Dordrecht. p. 3-73.
279. Kourilsky P, Viney G. Le principe de précaution : rapport au Premier ministre. 1999. https://www.vie-publique.fr/rapport/26392-le-principe-de-precaution-rapport-au-premier-ministre
280. Conseil économique, social et environnemental (CESE). Pour une politique publique nationale de sante environnement au coeur des territoires. 2021. https://www.lecese.fr/travaux-publies/pour-une-politique-publique-nationale-de-sante-environnement-au-coeur-des-territoires
281. Direction de la prévention, des pollutions et des risques. Circulaire BPSPR/2007-128/VD du 15 mai 2007 "Installations classées – Substances toxiques : Retour d'expérience sur la méthodologie d'évaluation des risques sanitaires". *Ministère chargé de l'Écologie*, 2007.
282. Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses) - Groupe de travail « Perturbateurs Endocriniens ». Traitement de l'incertitude dans le processus d'évaluation des risques sanitaires des substances chimiques - Rapport d'expertise collective. 2016. https://www.anses.fr/fr/system/files/SUBCHIM2009SA0331Ra-113.pdf
283. de Giudici, P. (SEPIA-Santé). Évaluations quantitatives des risques sanitaires de sites et sols pollués. Analyse des sources de variations et d'incertitudes dans l'estimation des expositions. *Association RECORD - REseau COopératif de Recherche sur les Déchets et l'Environnement*, 2014. RECORD 12-0675/1A. https://record-net.org/media/etudes/3/public/rapport/rapport-record12-0675-1a.pdf
284. Droissart A, Velly N, Ramel M. Prise en compte des incertitudes dans le cadre de dossiers conduits en contexte de sites et sols pollués. *Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris)*, 2020. https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/Rapport-Ineris-20-177730-1814933-Incertitudes%20SSP-v1.pdf
285. Bonnard R. Incertitudes liées à la modélisation de la contamination de l'environnement et de l'exposition : modèles multimédia. Cours délivré à l'École des hautes études en santé publique (EHESP) *Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris)*, 2009.
286. Comité de la prévention et de la précaution (CPP). La décision publique face à l'incertitude - Clarifier les règles, améliorer les outils. 2010. https://temis.documentation.developpement-durable.gouv.fr/docs/Temis/0067/Temis-0067249/18722.pdf
287. Kortenkamp A. Low dose mixture effects of endocrine disrupters and their implications for regulatory thresholds in chemical risk assessment. *Curr Opin Pharmacol* 2014 ; 19 : 105-11. DOI: https://doi.org/10.1016/j.coph.2014.08.006.

288. Got C. *L'expertise en santé publique - Que Sais-je*. Presses Universitaires de France, 2005.
289. Massé R. Les fondements éthiques et anthropologiques d'une participation du public en santé publique. *Éthique publique* 2005 ; 7(2). DOI: https://doi.org/10.4000/ethiquepublique.1943.
290. Callon M, Lascoumes P, Barthe Y. *Agir dans un monde incertain: essai sur la démocratie technique*. Seuil, 2001.
291. Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris). Commission d'orientation de la recherche et de l'expertise (CORE). https://www.ineris.fr/fr/ineris/organisation-gouvernance/commission-orientation-recherche-expertise-core [Consulté le : 01/09/2025]
292. Karr G, Boudet C, Ramel M. Définition d'une méthode d'identification et de hiérarchisation de substances préoccupantes – Application au cas particulier de la préparation du troisième Plan National Santé Environnement. *Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris)*, 2013. https://www.ineris.fr/fr/definition-methode-identification-hierarchisation-substances-preoccupantes-application-cas
293. Grammont V, Boudet C, Ramel M *et al*. Guide pour la conduite d'une étude de zone. Impact des activités humaines sur les milieux et la santé. *Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris)*, 2010. DRC-11-115717-01555B. https://www.ineris.fr/sites/default/files/contribution/Documents/drc-guide-etude-zone-v5final101111-1321430999.pdf
294. Commission spécialisée Risques liés à l'environnement (CsRE). Évaluation des risques sanitaires dans les analyses de zone. Utilité, lignes méthodologiques et interprétation. *Haut Conseil de la santé publique (HCSP)*, 2010. https://www.hcsp.fr/Explore.cgi/Telecharger?NomFichier=hcspr20101221_ersaz.pdf
295. National Research Council (NRC). Science and Decisions - Advancing Risk Assessment - report in brief. *The National Academy of Sciences*, 2008. https://nap.nationalacademies.org/resource/12209/IRA_brief_final.pdf
296. Journal officiel de la République française (JORF) n°51 du 2 mars 2005, 2005. Loi constitutionnelle n° 2005-205 du 1er mars 2005 relative à la Charte de l'environnement (1). https://www.legifrance.gouv.fr/eli/loi/2005/3/1/JUSX0300069L/jo/texte.
297. Vie publique. L'administration est-elle soumise au principe de précaution ? 2024. https://www.vie-publique.fr/fiches/20275-ladministration-est-elle-soumise-au-principe-de-precaution [Consulté le : 30/08/2025]
298. Commission européenne (CE). Communication de la commission sur le recours au principe de précaution. 2000. COM(2000) 1 final. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:52000DC0001
299. Noiville C. *Du bon gouvernement des risques*. Presses Universitaires de France (PUF), 2015.
300. Guyonnet D, Dubois D, de Fouquet C *et al*. Prise en compte des notions d'incertitude dans la gestion des sites et sols pollués. Etat des lieux et perspectives. *Agence de la transition écologique (ADEME) ; Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM)*, 2019. https://librairie.ademe.fr/urbanisme-territoires-et-sols/1761-prise-en-compte-des-notions-d-incertitude-dans-la-gestion-des-sites-et-sols-pollues.html
301. Journal officiel de la République française (JORF) n° 0022 du 27/01/2016, 2016. Loi n°2016-41 du 26 janvier 2016 de modernisation de notre système de santé. https://www.legifrance.gouv.fr/download/pdf?id=f1zqqKkO-FAUZH67_XjED1sDFihSq-tW46KWa2ISZzs=.

302. Siroux V, Agier L, Slama R. The exposome concept: a challenge and a potential driver for environmental health research. *European Respiratory Review* 2016 ; 25(140) : 124. DOI: https://doi.org/10.1183/16000617.0034-2016.
303. Ramalho O, Dassonville C, Grégoire A *et al*. Campagne Nationale Logements 2 (CNL2) : Etat de la qualité de l'air dans les logements en France métropolitaine (novembre 2020 – février 2023). *Centre scientifique et technique du Bâtiment (CSTB). Observatoire de la qualité des environnements intérieurs (OQEI)*, 2025. https://doi.org/10.82199/oqei-cnl2-9xa1-n126
304. Kirchner S, Arenes J-F, Cochet C *et al*. Campagne nationale logements (CNL) : état de la qualité de l'air dans les logements français. *Observatoire de la qualité de l'air intérieur (OQAI)*, 2007. https://www.oqei.fr/fr/campagnes-et-etudes/campagne-nationale-logements-1
305. Caudeville J, Velly N, Ramel M. Caractérisation des inégalités environnementales : inventaire des bases de données nationales environnementales et spatialisées. 2016. INERIS-DRC-15-152407-11231C.
https://www.ineris.fr/sites/default/files/contribution/Documents/drc-15-152407-11231c-fiches-inventairesvf2-1472201128.pdf
306. Ministère chargé de l'Écologie. Green Data for Health - Espace commun de données environnementales pour la santé. https://gd4h.ecologie.gouv.fr/ [Consulté le : 30/08/2025]
307. World Health Organization (WHO). Guidelines for drinking-water quality, 2nd edition: Volume 1 - Recommendations. 1993. https://www.who.int/publications/i/item/924154460O
308. Mantel N, Bryan WR. "Safety" testing of carcinogenic agents. *Journal of the National Cancer Institute* 1961 ; 27(2) : 455-470. DOI: https://doi.org/10.1093/jnci/27.2.455.
309. Kelly KE, Cardon NC. *The myth of 10-6 as a definition of acceptable risk*. à *84th Annual Meeting, Air & Waste Management Association, Vancouver, BC, Canada*. 1991. Vancouver, BC, Canada.
310. Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses). Valeurs toxicologiques de référence. Les particules de l'air ambiant extérieur. Avis révisé de l'Anses. Rapport d'expertise collective. 2025. https://www.anses.fr/sites/default/files/AIR2019SA0198RA.pdf
311. Ministère chargé de l'Écologie, 1999. Circulaire du 10/12/1999 relative aux sites et sols pollués et aux principes de fixation des objectifs de réhabilitation. https://aida.ineris.fr/reglementation/circulaire-101299-relative-sites-sols-pollues-principes-fixation-objectifs.
312. Barthélémy J-R, Blancher P, Marris C. Aménagement de l'espace et gestion des risques aux Pays-Bas. *Centre de Prospective et de Veille Scientifique - Direction de la recherche et des affaires scientifiques et techniques - Ministère de l'Equipement, des Transports et du Logement*, 2001. https://side.developpement-durable.gouv.fr/ACCIDR/doc/OAI_2/sdx-localhost-8080-temis-notices-Temis-0073492/amenagement-de-l-espace-et-gestion-des-risques-aux-pays-bas-a-rapport-drast-analyse-sociologique-des?_lg=fr-FR
313. Roqueplo P. *Entre savoir et décision, l'expertise scientifique*. Editions Quae, 1997.
314. Bérard Y, Crespin R. *Aux frontières de l'expertise: dialogues entre savoirs et pouvoirs*. Presses universitaires de Rennes, 2015.
315. Association française de normalisation (AFNOR). Norme NF X 50-110 : Qualité en expertise - Prescriptions générales de compétence pour une expertise. 2003. https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-x50110/qualite-en-expertise-prescriptions-generales-de-competence-pour-une-experti/fa199382/356305

316. Association Nationale des Docteurs (ANDès), Confédération des Jeunes Chercheurs (CJC). Guide du Doctorat - Fiche 21 : Le Doctorat à la Loupe - Compétences développées pendant le doctorat. 2018. https://guide-doctorat.fr/fiches/DoctoratALaLoupe-21.pdf
317. Site Internet d'Ineris formation. Ineris formation. https://www.ineris-formation.fr/fr/ineris-formation [Consulté le : 10/11/2025]
318. Horel S. La Grande Invasion. *Mosaïque Films, France Télévisions*, 2010. https://www.youtube.com/watch?v=0pMFfXYRzvo
319. Grandjean P. Paracelsus revisited: the dose concept in a complex world. *Basic & clinical pharmacology & toxicology* 2016 ; 119(2) : 126-132. DOI: https://doi.org/10.1111/bcpt.12622.
320. Lagarde F, Beausoleil C, Belcher SM *et al*. Non-monotonic dose-response relationships and endocrine disruptors: a qualitative method of assessment. *Environmental Health* 2015 ; 14 : 1-15. DOI: https://doi.org/10.1186/1476-069X-14-13.
321. Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses). Les perturbateurs endocriniens. *Les cahiers de la Recherche. Santé, Environnement, Travail*, 2019. https://www.anses.fr/system/files/CDLR-mg-PerturbateursEndocriniens13.pdf
322. Suchail S, Guez D, Belzunces LP. Characteristics of imidacloprid toxicity in two Apis mellifera subspecies. *Environmental Toxicology and Chemistry* 2000 ; 19(7) : 1901-1905. DOI: https://doi.org/10.1002/etc.5620190726.
323. Barouki R. Environnement et santé. Incertitude et précaution. *Raison présente* 2020 ; 214-215(2-3) : 119-130. DOI: https://doi.org/10.3917/rpre.214.0119.
324. Hubert P. Effet des faibles doses : preuves et inférences. *Environnement, Risques & Santé* 2010 ; 9(4) : 295-302. DOI: https://doi.org/10.1684/ers.2010.0365.
325. Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses). Avis de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail relatif à un guide d'évaluation du risque sanitaire spécifique aux nanomatériaux dans les produits destinés à l'alimentation. Saisine n° 2016-SA-0226. 2021. https://www.anses.fr/fr/system/files/ERCA2016SA0226.pdf
326. Danish Environmental Protection Agency (Danish EPA). Endocrine Disruptor Lists. List I: Substances identified as endocrine disruptors at EU level. 2025. https://edlists.org/the-ed-lists/list-i-substances-identified-as-endocrine-disruptors-by-the-eu [Consulté le : 02/09/2025]
327. Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses). Valeurs toxicologiques de référence (VTR). Guide d'élaboration de VTR de l'Anses. Mission permanente. Saisine n°2017-SA-0016. Troisième édition. Rapport d'expertise collective. 2017. https://www.anses.fr/system/files/SUBSTANCES2017SA0016Ra.pdf
328. Ministère chargé de la Santé, Santé publique France (SpF), Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses). Limiter les expositions aux perturbateurs endocriniens (PE). Fiche pour le patient. 2023. https://sante.gouv.fr/IMG/pdf/outil_pe_patient_limiter_les_expositions.pdf
329. Code du travail. Obligations de l'employeur. Article L4121-2. https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000033019913.
330. Collectif de 200 chercheurs. Tribune au « Monde ». Où vont la recherche et l'expertise scientifique sur les risques environnementaux et leurs impacts sanitaires ? *Le Monde*, 2019. https://www.lemonde.fr/sciences/article/2019/12/03/ou-vont-la-recherche-et-l-expertise-scientifique-sur-les-risques-environnementaux-et-leurs-impacts-sanitaires_6021522_1650684.html
331. Inspection générale de l'environnement et du développement durable (IGEDD), Inspection générale des affaires sociales (IGAS). Évaluation de la deuxième Stratégie nationale

sur les perturbateurs endocriniens. Pour une future stratégie « zéro exposition aux perturbateurs endocriniens ». 2024. https://igas.gouv.fr/nos-rapports/sante/evaluation-de-la-deuxieme-strategie-nationale-sur-les-perturbateurs-endocriniens-0
332. EFSA Panel on Food Contact Materials, Enzymes, Processing Aids (CEP), Lambré C, Barat Baviera JM *et al*. Re-evaluation of the risks to public health related to the presence of bisphenol A (BPA) in foodstuffs. *EFSA Journal* 2023 ; 21(4) : e06857. DOI: https://doi.org/10.2903/j.efsa.2023.6857.
333. Commission Européenne, 2023. Proposition de Règlement du Parlement européen et du Conseil relatif à la sécurité des jouets et abrogeant la directive 2009/48/CE. COM(2023) 462 final. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/HTML/?uri=CELEX:52023PC0462.
334. Droissart A, Lethielleux L, Duplantier S. État de l'art pour l'évaluation des risques de substances à effets sans seuil pour les enfants. *Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris)*, 2023. Ineris-203525-2704768v2.0. https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/Rapport-Ineris-203525-2704768-v2.0-Calcul%20de%20risque%20sans%20seuil%20pour%20population%20d%27enfants.pdf
335. Slama R. Santé environnementale : des lois faibles ou fragmentées. *Environnement, Risques Sante* 2022 ; 21(5) : 340-354. DOI: https://doi.org/10.1684/ers.2022.1676.
336. Agence européenne des produits chimiques (ECHA). Comité d'analyse socio-économique (CASE). https://echa.europa.eu/fr/about-us/who-we-are/committee-for-socio-economic-analysis [Consulté le : 10/11/2025]
337. European Commission (EC). Commission staff working document. Restrictions Roadmap under the Chemicals Strategy for Sustainability. 2022. https://ec.europa.eu/docsroom/documents/49734
338. Commission européenne (CE). Règlement CE n° 178/2002 du 28 janvier 2002 établissant les principes généraux et les prescriptions générales de la législation alimentaire, instituant l'Autorité européenne de sécurité des aliments (EFSA), récemment modifié par le règlement 2019/1381 du 20 juin 2019 relatif à la transparence et à la pérennité de l'évaluation des risques de l'Union dans la chaîne alimentaire. 2002. https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CONSLEG%3A2002R0178%3A20080325%3AFR%3APDF
339. Bergson H. *Mélanges*. Presses universitaires de France, 1972.
340. Laurent É. *The well-being transition: analysis and policy*. Springer Nature, 2021.
341. Fédération nationale des agences d'urbanisme (FNAU), Agence de la transition écologique (ADEME), Office français de la biodiversité (OFB). Abécédaire de la renaturation. Des définitions pour mieux cerner les enjeux de la renaturation dans le cadre du ZAN. *Les dossiers FNAU - N° 60 Octobre 2024*, 2024. https://www.fnau.org/wp-content/uploads/2024/10/fnau-60-abecedaire-renaturation-web_v2.pdf
342. Deboeuf De Los Rios G, Barra M, Grandin G. Renaturer les villes. Méthode, exemples et préconisations. *Institut Paris Region. Agence régionale de la biodiversité en Île-de-France (ARB ÎdF)*, 2022. https://www.arb-idf.fr/fileadmin/DataStorage/user_upload/ARB-idF_-_Renaturer_les_villes_-_WEB.pdf
343. Versini P-A. « Renaturer » les villes, une voie prometteuse pour mieux s'adapter au changement climatique. 2024. https://theconversation.com/renaturer-les-villes-une-voie-prometteuse-pour-mieux-sadapter-au-changement-climatique-239624 [Consulté le : 11/11/2025]

344. Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (Cerema). Construire la nature en ville avec les citoyens - Les essentiels. 2021. https://publications.cerema.fr/webdcdc/les-essentiels/nature-en-ville/datas/pdf/nature_en_ville.pdf
345. Collard M, Host S, Colombier C *et al*. Santé et biodiversité. Analyse des enjeux pour une approche intégrée en Île-de-France. *Observatoire régional de santé (ORS) Île-de-France, Agence régionale de la biodiversité Île-de-France (ARB) Île-de-France*, 2023. https://www.ors-idf.org/fileadmin/DataStorageKit/ORS/Etudes/2023/SanteEtBiodiversite/2023_sante_biodiverstite_ORS_ARB.pdf
346. Baecher C, Pianu B, Ungerer A *et al*. Benchmark international des politiques publiques de la qualité de l'air intérieur. *Agence de la transition écologique (ADEME)*, 2017. https://librairie.ademe.fr/air-et-bruit/3800-benchmark-international-des-politiques-publiques-pour-preserver-et-ameliorer-la-qualite-de-l-air-interieur.html
347. Cargouet M, Louis A, AECOM. Benchmark international sur la gestion des sites à responsables défaillants et des friches. 2024. https://librairie.ademe.fr/urbanisme-territoires-et-sols/7794-benchmark-international-sur-la-gestion-des-sites-a-responsables-defaillants-et-des-friches.html
348. Lageron V. Quelles sont les valeurs fixées dans les sols pour la catégorisation des sites chez nos voisins européens ? 20ème Journée Technique d'information et de retour d'expérience de la gestion des sites et sols pollués – 04 décembre 2024. *Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris)*, 2024. https://www.ineris.fr/sites/default/files/contribution/Documents/JT%20SSP%202024%20-Valeurs%20fix%C3%A9es%20sol%20europe%20LAGERON.pdf
349. Amara A, Lethielleux L, Velly N *et al*. Synthèse bibliographique des valeurs repères et réglementaires dans l'air intérieur à l'échelle internationale en lien avec les sites et sols pollués. *Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris)*, 2020. Ineris-20-178314-2201674-v2.0. https://www.ineris.fr/sites/default/files/contribution/Documents/Rapport-Ineris-20-178314-2201674_ADEME%20v2.pdf
350. Chapon V, Brignon J-M, Rouil L. Benchmark international des stratégies de réduction des rejets de micropolluants par les eaux usées urbaines. *Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris)*, 2018. DRC-18-158744-11471A. https://www.ineris.fr/sites/default/files/contribution/Documents/INERIS_2018_017_04_DRC-18-158744-11471A_Benchmark_strat%C3%A9gies_micropolluants_eaux_us%C3%A9es_AFB_2018.pdf
351. Bonnard R, Cicolella A, Hubert P. Estimation de l'impact des rejets des installations industrielles et utilisation de la démarche d'évaluation de risques à l'étranger. *Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris)*, 2006. N°76413/197. https://www.ineris.fr/sites/default/files/contribution/Documents/%28351tat_des_lieux3%29.pdf
352. Site Internet AIDA. Qu'est-ce qu'IMPEL ? https://aida.ineris.fr/inspection-icpe/inspection-installations-classees/echanges-internationaux/quest-quimpel [Consulté le : 08/02/2026]
353. Hansson S. *The Ethics of Risk: Ethical Analysis in an Uncertain World*. Palgrave Macmillan UK, 2013.
354. Slovic P. 1988. Risk perception, dans *Carcinogen Risk Assessment*. Springer. p. 171-181.
355. Airparif. Bilan de la qualité de l'air en Île-de-France - 2024. 2025. https://www.airparif.fr/sites/default/files/document_publication/BilanQA_IDF_2024.pdf

356. United States Environmental Protection Agency (US EPA). IRIS Toxicological Review of Inorganic Arsenic. CASRN 7440-38-2. 2025. EPA/635/R-25/005Fc. https://iris.epa.gov/static/pdfs/0278tr.pdf