Thèse pour obtenir le grade de docteur

Délivré par l'Université de la Réunion

UNIVERSITÉ DE LA RÉUNION

Préparée au sein de l'école doctorale STS

Et de l'unité mixte de recherche PVBMT

Spécialité : Épidémiologie

Présentée par Ismaël Houillon

Modélisation du paysage agricole et inférence du risque pour l'accompagnement des réseaux d'Épidémiosurveillance : application au paysage agrumicole réunionnais

Soutenance le 27/06/2022

Jury :

Catherine Abadie, Chercheuse HDR du CIRAD, UMR PHIM	Rapporteur
Frédéric Hamelin, Maître de conférence d'Agrocampus Ouest, UMR IGEPP	Rapporteur
Bernard Reynaud, Professeur de l'Université de la Réunion, UMR PVBMT	Président du jury
Virginie Ravigné, Chercheuse HDR du CIRAD, UMR PHIM	Directrice de thèse

Membres invités :

Samuel Soubeyrand, Directeur de recherche de l'INRAE, UR BioSP	Co-directeur
Aude Chabirand, Directrice d'unité à l'ANSES, Unité LSV-RAPT	Co-encadrante
Anne Quillévéré-Hamard, Chargée de projet à l'ANSES, Unité EAS	Co-encadrante

cirad anses INRAE

Remerciements

Après cette aventure de trois années et demie, beaucoup de personnes sont à remercier et j'espère que je n'en oublierai aucune.

Tout d'abord, cette thèse n'aurait pas pu voir le jour ni aboutir sans ma directrice **Virginie Ravigné**. Je tiens à te remercier non seulement pour la grande rigueur scientifique dont tu fais preuve mais aussi pour l'humanité avec laquelle tu as assuré mon encadrement. Les échanges que nous avons partagés ont enrichi ma vie bien au-delà de la thèse.

Un grand merci à **Samuel Soubeyrand** de m'avoir accueilli au sein de l'unité BioSP à Avignon. Tes appuis scientifiques toujours pertinents et ta disponibilité m'ont beaucoup aidé.

Je tiens à remercier **Aude Chabirand** pour son implication et qui même avec un emploi du chargé gardait sa porte ouverte au bout du couloir pour répondre à mes questions.

Merci à **Pauline de Jerphanion** et à **Anne Quillévéré** qui a assuré la relève. Malgré la difficulté de prendre un travail en cours de route, tu as su apporter ton expérience et me guider vers l'OASIS.

Merci à **Olivier Pruvost** de m'avoir amené chasser de l'agrume et tâté du tangor. Merci également à **Bruno Hostachy** pour ces partages bibliographiques et ses conseils toujours à propos.

Merci à **Lucie** et **Marie** pour l'aventure Quæ.

Les laboratoires dans lesquels j'ai été accueilli ont été un cadre chaleureux, propice au bon déroulement de ma thèse. J'ai notamment de nombreux collègues à remercier au sein du 3P. Merci à **Nathalie**, **Nicolas**, **Maëva**, **Gilles**, **Benoit**, **Sélim**, **Fred**, **Alizé**, **Nicolas**, **Sohini**, **Sébastien** et tous les autres, qui autour d'un café, ont su aussi bien parler sciences avec passion que partager un sourire. Merci également pour le chaleureux accueil que j'ai reçu à l'unité PHIM de Montpellier. Malgré le caractère un peu troglodyte que peut susciter une phase de rédaction, je me suis senti très intégré parmi vous. Et je peux en dire tout autant de l'unité EAS de Lyon qui m'a accueilli à mes débuts et que je remercie.

Pour leurs conseils avisés, je tiens à adresser un grand merci aux membres du comité de suivi de thèse **Gaël Thébaud**, **Nicolas Sauvion**, **Viviane Hénaux** et **Frédéric Chiroleu**.

Ce travail a été cofinancé par l'Union européenne : Fonds européen de développement régional (**FEDER**), par le Conseil Régional de La Réunion et par le Centre de Coopération internationale en Recherche agronomique pour le Développement (CIRAD).

« Je suis ravi de rendre service mais je vous rappelle que ce n'est pas fonction la surveillance ». J'aurais eu en tête cette réplique du maître d'armes tout au long de ma thèse. Et c'est pourquoi j'ai beaucoup d'admiration pour les personnes qui se donnent du mal pour que la surveillance existe. Que soit ici remercier la FDGDON et plus particulièrement **Estelle Roux**, **Romuald Fontaine**, **Élisa Payet** et **Janice Minatchy**, avec qui j'ai eu le plaisir d'interagir. Évidemment un grand merci aussi aux membres de la DAAF **Bruno Debenay**, **Steve Dupuy**, **Alexandre Coddeville** et **Camille Demassieux** qui entre toutes leurs missions ont trouvé du temps à partager pour faire avancer mes recherches.

Ce travail a été rendu possible par les stagiaires qui nous ont prêté main forte et ils ne seront pas oubliés. Merci à **Camille**, **Corentin**, **Marine**, **Nathan**, **Edouard**, **Rhianna, Claire** et **Captain Aurélien** que j'ai eu le plaisir de retrouver à Montpellier. Je n'oublierai pas non plus tous les bons moments passés aux cases stagiaires et rappelons que ce qui se passe aux cases reste aux cases.

Pour la collaboration professionnelle tellement agréable que l'on oublie que l'on travaille, merci à **DoAna** pour l'application zagrumes 974. Je ne peux que recommander cette statisticienne géniale.

Il fallait une personne qui comprenne ce que je traverse. Une personne aussi folle que moi pour écouter du Rammstein à fond ou faire des mouches en pâte à modeler. Une personne qui m'a supporté au quotidien. Cette personne, c'est toi **Paola**, merci d'avoir été un binôme à toutes épreuves.

Je tiens également à remercier les personnes qui m'ont un jour éclairé un bout du chemin. Aujourd'hui en me retournant, je peux voir les orientations bénéfiques que ma vie a prise grâce à ses rencontres. La plus fameuse d'entre elles est avec **Raymond Leborgne**. Professeur à la fac, senseï au dojo, vous m'avez inspiré tout au long de ce travail. Ti lamp ti lamp, l'escargot a grimpé le mont Fuji.

Le soutien que j'ai reçu de ma famille a été un moteur puissant pour persévérer dans la thèse. Merci **Maman** pour ton soutien sans faille et tes lettres. Merci **Papa** pour tes encouragements et tes photos de nos Vosges natales. Merci à tous les **Houillon** et tous les **Colin**. Merci à ma marraine **Marie-Odile**, soutien de toujours dans mes études. « To my brother **Timothé**, the only man I ever loved ».

« Celui qui a des amis ne connait pas l'échec ». Je connais désormais le sens de cette citation. Alors je remercie du fond du cœur tous mes amis qui m'ont soutenu dans les moments difficiles et qui m'ont apporté tant de joie. Merci à **Adrien**, **Antoine**, **Amande**, **Amaury**, **Eglantine**, **Jean**, **Jeanne**, **Marine**, **Thibault**. Merci à mes Reuleuleux **Nathan**, **Samantha** et **Florent**, qui ont rendu moins amer les confinements et qui sont toujours prêts pour les bons moments. Merci à la **team plouf**, le lagon et les crêpes, voilà une manière saine de commencer la journée.

Merci à mes rayons de soleil des tropiques **Ramion**, **Annanas**, **Poussin**, **Fannette**, **Julia**, **Amélie**

Je dédie cette thèse à l'agrume le plus précieux à mes yeux… **Clémentine**.

Sommaire

Listes des figures et annexes hors chapitres 12

INTRODUCTION **15**

1. La surveillance des maladies de plantes **16**

1.1. Les maladies infectieuses des plantes 16

1.2. La surveillance et ses enjeux 17

1.3. Principe et mise en œuvre opérationnelle de la surveillance 18

1.3.1. Définir les plans de surveillance 18

1.3.2. Mettre en œuvre la surveillance 19

2. Le Huanglongbing (HLB) **19**

2.1. La principale contrainte sur la production agrumicole dans le monde 19

2.2. Biologie 22

2.2.1. Bactéries causales 22

2.2.2. Vecteurs 22

2.2.3. Hôtes 26

2.3. Un défi pour la surveillance 27

3. L'agrumiculture à la Réunion **28**

4. Le HLB à la Réunion **31**

4.1. Une première épidémie considérée comme éradiquée 31

4.2. Une nouvelle épidémie encore en cours 31

4.3. Une organisation originale de la surveillance 32

4.4. Une stratégie de surveillance en évolution 35

4.5. Un contexte compliqué 37

5. Problématiques scientifiques **37**

Avant-propos 1 41

CHAPITRE 1 : La surveillance active des menaces phytosanitaires émergentes **42**

1. Introduction **44**

2. Définir les menaces **47**

2.1. La veille sanitaire internationale 47

2.2. La classification des organismes nuisibles 48
3. Définir une stratégie d'échantillonnage 49
3.1. Stratégies d'échantillonnage classique 49
3.2. Stratégies d'échantillonnage basées sur le risque 50
3.3. Échantillonnage à partir de foyers 52
4. Mettre en place une organisation efficace 53
4.1. Le territoire agricole hors forêt 53
4.2. Les forêts 54
4.3. Les frontières 55
4.4. Articulation des stratégies d'échantillonnage 55
5. Gérer et exploiter les données 56
5.1. Le devenir des données 56
5.2. La surveillance comme étape de la lutte 56
5.3. L'amélioration continue de la surveillance 57
5.4. Sensibilisation et information 57
6. Conclusion 59
7. Références 60
8. Glossaire 62

Avant-propos 2 64

CHAPITRE 2A : Améliorer la connaissance du paysage agrumicole à la Réunion 65

Article soumis : Improved knowledge on cultivated citrus landscape in Reunion island: Consequences for the surveillance of Huanglongbing. 66

CHAPITRE 2B : Inférence du risque 102

1. Introduction 103
2. Matériel et méthodes 105
2.1. Données de surveillance du HLB et variables éco-climatiques 105
2.2. Tri des variables 107
2.3. Liens entre présence/absence de la maladie et variables éco-climatiques et paysagères 108
2.4. Prédiction du statut sanitaire des parcelles d'agrumes 109

2.5. Inférence du risque à l'échelle du territoire 109

3. Résultats 111

3.1. Tri des variables 111

3.2. Liens entre présence/absence de la maladie et variables éco-climatiques et paysagères 113

3.3. Prédiction du statut sanitaire des parcelles d'agrumes 114

3.4. Inférence du risque à l'échelle du territoire 116

4. Discussion 118

5. Références 121

6. Annexes 124

Avant-propos 3 129

CHAPITRE 3 : L'évaluation OASIS du réseau de surveillance du HLB à la Réunion 130

Abstract 132

1. Introduction 133

2. Materials and methods 134

2.1. The HLB surveillance network of Réunion 134

2.2. Evaluation method 136

3. Results 140

4. Discussion 145

5. References 150

6. Supplementary material 152

CONCLUSION ET PERSPECTIVES 155

1. Conclusion générale 156

1.1. Les objectifs de la thèse 156

1.2. Résultats principaux 156

2. Perspectives 160

2.1. Les possibilités d'amélioration de la surveillance par la recherche 161

2.2. Les échanges de données surveillance/recherche 163

2.3. La place de la recherche 164

Annexes **167**

Références **169**

Abstract **176**

Résumé **177**

Liste des figures, tableaux et annexe hors chapitres

Figure 1 : Photographies des différents symptômes du HLB, issues de la fiche d'information sur le HLB à la Réunion.

Figure 2 : Photographies des psylles vecteurs du HLB, issues de la fiche d'information sur le HLB à la Réunion.

Figure 3 : Cartes de distribution des deux espèces vectrices du HLB, respectivement *D.citri* (carte du haut) et *T. erytreae* (carte du bas), issues de l'Organisation européenne et méditerranéenne pour la protection des plantes (EPPO). Les points jaunes symbolisent la présence des insectes, les points violets une présence transitoire. Les pays en orange sont ceux où une signalisation de l'insecte a été effectué. La dernière mise à jour date du 30/03/2022.

Figure 4 : Schéma récapitulatif des différents compartiments intervenant dans le développement d'une épidémie de HLB avec *D. citri* comme vecteur. Houillon, Pruvost, Ravigné, 2019.

Figure 5 : Conditions éco-climatiques observées à la Réunion. (A) Reliefs. Les lignes de couleur représentent les courbes de niveau (isoclines). Le dégradé de couleur représente, du plus clair au plus foncé, les altitudes de 0 à 3000 mètres. Les lignes noires représentent les délimitations des communes. (B) Pluviométrie. Les polygones représentent des bandes isométriques des médianes des niveaux de pluviométrie annuelles sur 30 ans. (C) Températures. Les polygones sont les isothermes des températures annuelles moyennes sur 30 ans. Ces cartes sont des adaptations de couches d'information géographiques disponibles sur le catalogue de données géographiques AWARE (Atlas Web Agricole pour la Recherche) (https://aware.cirad.fr).

Figure 6 : Organisation de la surveillance du HLB à la Réunion selon les fonctions définies par la méthode OASIS. Les flèches symbolisent la remontée des données.

Figure 7 : Vue d'écran de la cartographie des vergers réalisée sur le catalogue Aware (https://aware.cirad.fr/layers/geonode:agrumes).

Figure 8 : Cartographie des échantillonnages dans les jardins des particuliers. Les points verts, oranges, rouges représentent respectivement les échantillons négatifs, faiblement positifs et fortement positifs. Les coordonnées ont été bruitées aléatoirement pour le respect de la protection des données privées.

Figure 9 : Réflectance moyenne en fonction des longueurs d'ondes. Les courbes, en vert et en rouge, représentent la réflectance moyenne des arbres respectivement sains et infectés.

Figure 10 : Capture d'écran de l'application R shiny Zagrumes974 pour la communication autour du HLB à la Réunion en collaboration avec DoAna (https://rdrr.io/github/anna-doizy/zagrumes974/).

Tableau 1 : Historique des différents plans d'échantillonnage de 2015 à 2017.

Tableau 2 : Historique des différents plans d'échantillonnage de 2018 à 2020.

Annexe 1 : Fiche sanitaire HLB sur agrumes.

INTRODUCTION

1. La surveillance des maladies de plantes

1.1. Les maladies infectieuses des plantes

L'émergence d'une maladie infectieuse peut être définie par une augmentation de l'incidence d'une maladie causée par un agent pathogène soit au niveau géographique soit au niveau du spectre d'hôtes (Anderson *et al*., 2004). Ce type de nouvelle menace concerne les humains, mais aussi les animaux et les plantes, dans les compartiments domestiques ou cultivés et sauvages. Depuis les années 2000, l'approche « One Health » tend à prendre en compte l'interdépendance entre animaux, humains et écosystèmes (Gibbs, 2014). Depuis plus récemment, cette approche est mise en place par un groupe d'experts de haut niveau dans une collaboration entre l'Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), l'Organisation mondiale de la santé animale (OIE), l'Organisation mondiale de la Santé et le Programme des Nations unies pour l'environnement (PNUE). Par cette collaboration, est reconnue l'impossibilité de dissocier la santé des animaux, des humains, des plantes et des écosystèmes, ainsi que les menaces auxquelles elles ont à faire face (OHHLEP Annual Report, 2021). Ces potentielles menaces peuvent se concrétiser de manière très directe pour les humains comme nous en faisons l'expérience depuis 2019 avec le coronavirus SARS-COV2 (Singhal, 2020). Les maladies des plantes constituent également un péril important à la fois d'un point de vue économique et dans une perspective de sécurité alimentaire.

Les maladies des plantes sont responsables d'importants dégâts dans les cultures de première nécessité, menaçant la sécurité alimentaire. Les pertes de la production agricole mondiale sont estimées à environ 50% du volume produit (Oerke, 1999 ; Yudelman *et al*., 1998). Ces dégâts se produisent de la culture à la consommation et sont causés par une grande variété de ravageurs (dont les nématodes) et d'agents pathogènes (champignons, bactéries, virus…). La pyriculariose du riz, causée par le champignon *Pyricularia oyzae*, est un exemple de grave menace sur une culture de première importance, avec des pertes chiffrées à 55 millions de dollars par an en Asie du Sud et du Sud-Est (Kuyek, 2000). Même en dehors de la stricte sécurité alimentaire, les maladies des plantes cultivées peuvent avoir des conséquences économiques désastreuses. Par exemple, le complexe de dessèchement rapide de l'olivier causé par la bactérie *Xylella fastidiosa* est une maladie particulièrement menaçante en Europe. En effet, l'épidémie, qui a touché la région des Pouilles, s'est propagée en Italie, contaminant 22 millions de plantes dont 6,5 millions d'oliviers morts (Martínez Sánchez *et al*., 2019). Non seulement la maladie se propage dans le bassin méditerranéen, mais la bactérie ayant une large gamme d'hôtes (Purcell, 2013), sa propagation passe également par le compartiment sauvage. Selon des travaux de modélisation, dans un scénario défavorable, l'impact économique estimé pour l'Italie serait une perte estimée entre 1,9 et 5,2 milliards d'euros sur 50 ans

(Schneider *et al*., 2020). Les plantes pérennes sont particulièrement sujettes aux épidémies de par la durée de leur exposition aux agents pathogènes. Le champignon *Microcyclus ulei* cause par exemple des ravages dans les plantations d'hévéa d'Amérique du Sud (Heng et Joo, 2017). Cette maladie, caractérisée par des lésions productrices de spores sur les feuilles, détruit les arbres par défoliation avant maturité. Aucune méthode de lutte n'est disponible (Lieberei, 2007). Pour de très nombreuses maladies des plantes pérennes, il n'existe pas vraiment de traitement curatif. C'est le cas pour les bactérioses des agrumes que sont le chancre citrique ou le Huanglongbing, qui sera l'objet de cette thèse. C'est aussi le cas de viroses, comme le dépérissement foliaire du cocotier, causé par un nanovirus, dont les méthodes de lutte se limitent la gestion des insectes vecteurs et à la sélection de cultivars résistants. Parfois des traitements prophylactiques existent, permettant de réduire la probabilité de contamination d'un arbre. Par exemple, sur les agrumes, l'application de cuivre sur les « flushs » de jeunes feuilles permet de réduire la contamination par le chancre citrique. Mais l'usage de ces produits doit être le plus raisonné possible.

1.2. La surveillance et ses enjeux

Le premier chapitre de la thèse étant consacré à détailler ce qu'est la surveillance et sa mise en place, dans cette introduction, nous la décrirons ici de façon simplifiée. La surveillance des maladies des plantes revêt une importance capitale. La surveillance épidémiologique consiste à recueillir et analyser le statut sanitaire des plantes dans des délais appropriés à des mesures de gestion efficaces (Last, 2001).

La surveillance consiste d'abord définir les menaces prioritaires pour la santé des plantes, on parle alors de vigilance. Elle s'avère nécessaire devant la rapidité d'émergence des menaces dans des territoires initialement exempts. Cette vigilance s'appuie sur la collecte d'informations et de signaux d'alerte sur internet et dans la littérature scientifique à propos de nouveaux pathogènes ou ravageurs, appelée veille sanitaire. Par exemple, la maladie des feuilles de l'hévéa évoquée plus haut fait l'objet d'une veille d'importance capitale pour la production du latex extrait de l'hévéa dans les régions qui ne sont pas encore touchées par la maladie comme en Asie et en Afrique (Hashim, 2012).

La surveillance permet aussi, lorsqu'une épidémie se déclenche, (i) d'identifier les premiers foyers en vue de prendre des mesures d'éradication lorsque c'est possible, (ii) de suivre l'avancée des foyers et déterminer des zones autour de ces foyers qui pourront faire l'objet d'un train de mesures de freinage, et (iii) de cartographier les zones contaminées. Selon le groupe de travail sur *Xylella fastidiosa* de la plateforme d'Épidémiosurveillance en Santé Végétale, l'un des objectifs de la

surveillance de la bactérie est par exemple la délimitation de zones tampons autour des épicentres épidémiologiques.

1.3. Principe et mise en œuvre opérationnelle de la surveillance

En dehors de la veille, la surveillance d'un territoire, avant ou pendant une émergence, repose avant tout sur la collecte de données dans ce territoire dans l'espace et le temps, et l'interprétation de ces données en vue d'ajuster la surveillance et prendre des décisions éclairées de gestion. Cette collecte de données pose des défis de deux ordres :

- D'une part, il existe un défi méthodologique pour définir un plan d'échantillonnage qui permette de fournir les données dont les décideurs auront besoin.
- D'autre part, il existe un défi logistique dans la mise en œuvre de toutes les étapes nécessaires à la production et à l'interprétation de ces données, qui consiste à mobiliser une diversité d'acteurs, appartenant à différentes institutions, autour de cet objectif commun.

1.3.1. Définir les plans de surveillance

La définition des plans de surveillance est un exercice complexe. Longtemps, celle-ci a reposé sur la détection d'espèces invasives ou de ravageurs et sur des principes statistiques pour l'échantillonnage ciblés vers ces espèces. Cependant, la surveillance s'en retrouvait très dépendante des connaissances sur les espèces en question. Dans un article fondateur, Parnell *et al*. (2014) posent les bases de la surveillance basée sur le risque en santé des plantes. Depuis, ce type de surveillance a été utilisé pour des cas concrets comme pour la mort subite du chêne en Californie. Cette maladie, causée par le champignon *Phytophtora ramorum*, fait des dégâts parmi les chênes de l'ouest des Etats-Unis depuis sa première détection en 1995. Bussell et Cunniffe (2020) ont montré que les stratégies de contrôle de la maladie pouvaient être optimisées, notamment en matière de diminution de coûts, par une surveillance continue, orientée par la modélisation de la maladie. Dans d'autres cas, la modélisation permet d'évaluer et comparer différentes stratégies de surveillance. Prenons comme exemple la bactérie *Xylella fastidiosa* arrivée dans le sud de la France en 2015. Pour orienter l'effort d'échantillonnage dans cette région, Martinetti et Soubeyrand (2018), après avoir cartographié le risque, en utilisant des méthodes de modélisation de niche, ont proposé divers plans de surveillance et les ont évalués et comparés afin de minimiser la probabilité de rater la maladie. Il est possible également de faire des rétrospectives sur des épidémies ayant eu lieu dans le passé, et de mettre en lumière ce qui a fait défaut dans la gestion de la crise. La maladie de l'orme au Royaume-Uni en est un

bon exemple (Tomlinson et Potter, 2010). Les auteurs ont reconstitué l'historique de la maladie et les décisions qui ont été prises pour la gérer, montrant que les actions étaient trop faibles et trop tardives par rapport aux moments clés, pour avoir un impact efficace sur l'épidémie.

1.3.2. Mettre en œuvre la surveillance

Pour la mise en place de la surveillance, au moins trois groupes de personnes sont nécessaires (plus de détails dans le chapitre 1) :

- Les commanditaires qui décident de ce qu'il faut surveiller. Il s'agit de l'organisation centrale.
- Les acteurs de terrain, formant l'organisation institutionnelle de terrain, qui se rendent dans les endroits à surveiller et récoltent les échantillons. Ils peuvent assurer l'analyse des données récoltées.
- Les laboratoires, auprès de qui les échantillons vont être apportés, vont assurer un diagnostic de l'objet de la surveillance.

L'ensemble de ces personnes forment un réseau de surveillance, pour lequel il est possible d'établir les forces et les faiblesses. C'est le but de la méthode OASIS (Outil d'analyse des systèmes de surveillance), développée un groupe de travail de l'Anses, initialement pour les réseaux de surveillance animale. Cette méthode dresse un bilan du dispositif et montrent les pistes d'amélioration possibles en se basant sur des entretiens et l'attribution de notes en concertation avec les acteurs interrogés (Hendrikx *et al*., 2011).

2. Le Huanglongbing (HLB)

Dans cette thèse nous allons nous intéresser plus particulièrement à la surveillance du Huanglongbing (ou HLB) à la Réunion. Dans ce qui suit, le HLB sera décrit dans son historique épidémiologique et dans sa biologie, en montrant les défis qu'il pose pour la surveillance.

2.1. La principale contrainte sur la production agrumicole dans le monde

Le HLB a été décrit pour la première fois en Chine en 1925 (Lin, 1956), sous l'appellation maladie de la pousse jaune (souvent traduite à tort comme la maladie du dragon jaune). Il s'est répandu dans d'autres pays d'Asie dans les années 60 et 70. Il a été décrit en Afrique dans les années 70 et 80. Les Etats-Unis ont été touchés pour la première fois en 2005, avec une première détection en Floride. Il

est aujourd'hui présent dans tous les bassins de production d'agrumes du monde, à l'exception du bassin méditerranéen qui n'a pas encore connu d'épidémie de HLB.

Pour l'industrie de la production d'agrumes, le HLB est considéré comme la plus grande menace. Aux Etats-Unis par exemple, cette industrie représente 3,35 milliards de dollars. Après l'épidémie des années 2000, c'est 60 % de la surface de production qui a été perdue ainsi que 80 % des usines à jus. Pour pallier cela, en plus des mesures de gestion, 45 millions de dollars ont été injectés dans la recherche sur le HLB en 2020. Entre 2006 et 2011, selon Hodges et Spreen (2011), 8 257 emplois ont été impactés par la crise du HLB en Floride, avec une perte totale estimée à 4,5 milliards de dollars en combinant les effets directs et indirects. Les effets directs sont les dégâts dus à la maladie. Ils sont d'autant plus importants que la maladie a des symptômes très contraignants et difficiles à diagnostiquer.



Aspect marbré des feuilles et taches jaunes asymétriques



Forme dissymétrique des fruits (malformation)



Anomalie dans la coloration des fruits

Figure 1 : Photographies des différents symptômes du HLB, issues de la fiche d'information sur le HLB à la Réunion (Annexe 1).

Le HLB cause des tâches jaunes asymétriques ainsi qu'un aspect marbré des feuilles. Les fruits deviennent asymétriques avec des pépins avortés. On note également une anomalie dans la coloration des fruits qui est inversée (Fig.1). Ils chutent précocement. Des rameaux dépérissent, et les arbres

meurent. A ces dommages s'ajoutent les pertes liées aux mesures de lutte essentiellement basée sur l'arrachage des arbres malades et des restrictions de quarantaine.

2.2. Biologie

2.2.1. Bactéries causales

Le HLB est causé par des bactéries du genre *Candidatus* Liberibacter. Il s'agit de bactéries Gram négatives. Trois espèces sont connues pour être responsables du HLB : *Ca.* L. *asiaticus* (*C*L*as*), *Ca.* L. *africanus* (*C*L*af*) et *Ca.* L. *americanus* (*C*L*am*). Ces bactéries sont inféodées au phloème, qui s'obstrue par des dépôts de callose provoqués par la réponse immunitaire de la plante (Sechler *et al*., 2009). Ces bactéries étant non cultivables, il est difficile de développer un traitement, et à ce jour, aucun n'existe. C'est pourquoi un arbre infecté finira systématiquement par mourir. Si les agrumes sont les hôtes sur lesquels on va le plus observer la maladie et le développement de symptômes (Damsteegt *et al.*, 2010), l'ensemble des Rutaceae peuvent héberger la bactérie. Sur 42 plantes reconnues plantes hôtes du HLB, seulement cinq ne sont pas des Rutaceae (Rapport expertise collective Anses, 2019).

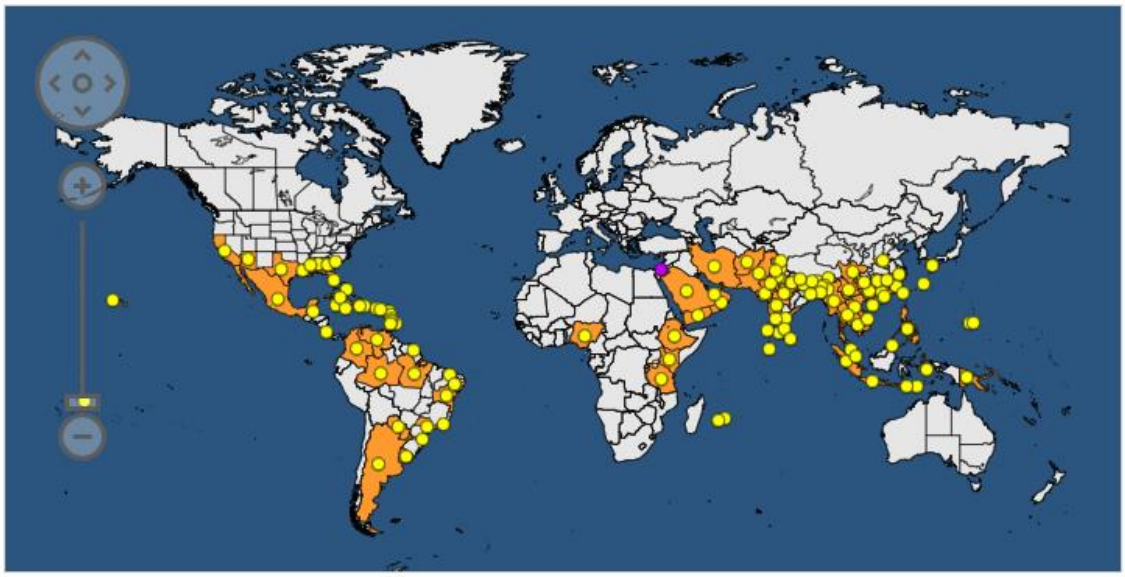
2.2.2. Vecteurs

Il existe deux espèces de vecteurs avérés : *Diaphorina citri* Kuwayama et *Trioza erytreae* Del Guerico (Sauvion, 2018). Ces deux espèces sont des insectes piqueurs-suceurs de la famille des psylles (Hemiptera, Sternorrhyncha, Psylloidea) (Fig.2).



Figure 2 : Photographies des psylles vecteurs du HLB, issues de la fiche d'information sur le HLB à la Réunion (Annexe 1).

En l'état des connaissances actuelles, il n'y a pas d'autre vecteur connu bien qu'il existe une cochenille capable d'acquérir C*Las*. *D. citri* est vectrice de C*Las* et C*Lam*, et *T. erytreae* est vectrice de C*Laf*. Le premier rapport faisant état de C*Las* dans *T. erytreae* au champ en Ethiopie vient de voir le jour (Ajene *et al*., 2019). *D. citri* est largement répandu dans les zones tropicales alors que *T. erytreae* est plus cantonné au continent africain (Fig.3). Ce dernier a récemment été détecté dans la péninsule ibérique, où il fait l'objet de mesures de lutte (EPPO Reporting Service n°08, 2020/164). Il a une préférence pour les zones fraiches et humides et les larves de stade I sont sensibles à la siccité de l'air.



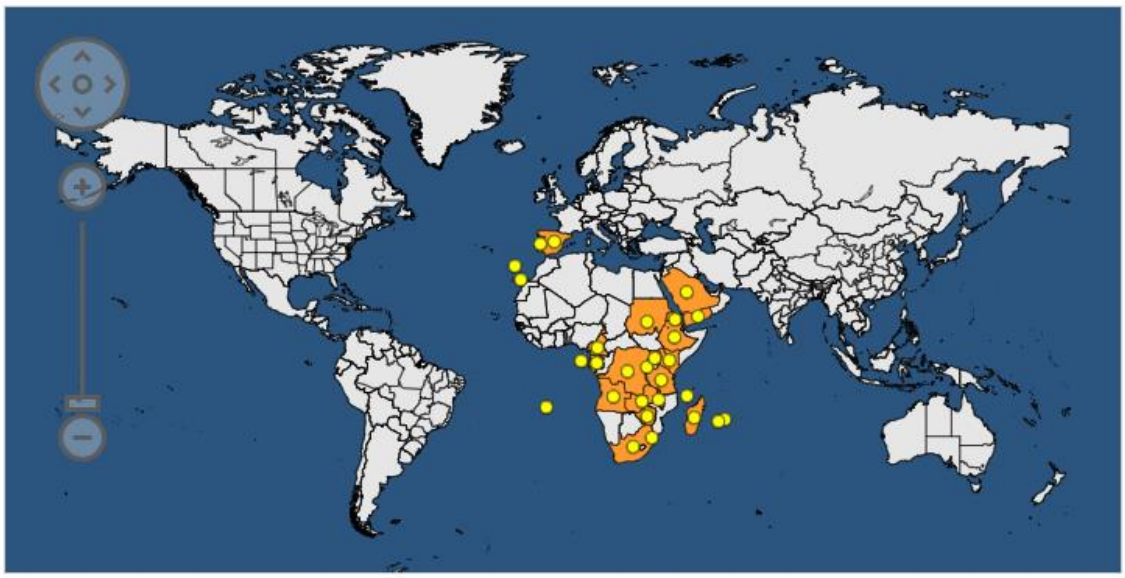


Figure 3 : Cartes de distribution des deux espèces vectrices du HLB, respectivement *D.citri* (carte du haut) et *T. erytreae* (carte du bas), issues de l'Organisation européenne et méditerranéenne pour la protection des plantes (EPPO). Les points jaunes symbolisent la présence des insectes, les points violets une présence transitoire. Les pays en orange sont ceux où une signalisation de l'insecte a été effectué. La dernière mise à jour date du 30/03/2022.

Le cycle de vie de ces psylles est constitué de cinq stades larvaires et d'un stade adulte. Environ une semaine sépare chaque stade. Cependant, le cycle est dépendant de la température et les temps peuvent être réduits en milieu tropical. Il y a ainsi dix cycles par an et pas de diapause dans ces milieux. La capacité vectrice n'est présente qu'aux stades IV, V et adultes et se conserve d'une mue à l'autre. Il n'y a pas en revanche de transmission transovarienne (Capoor et al., 1974) (Fig.4).

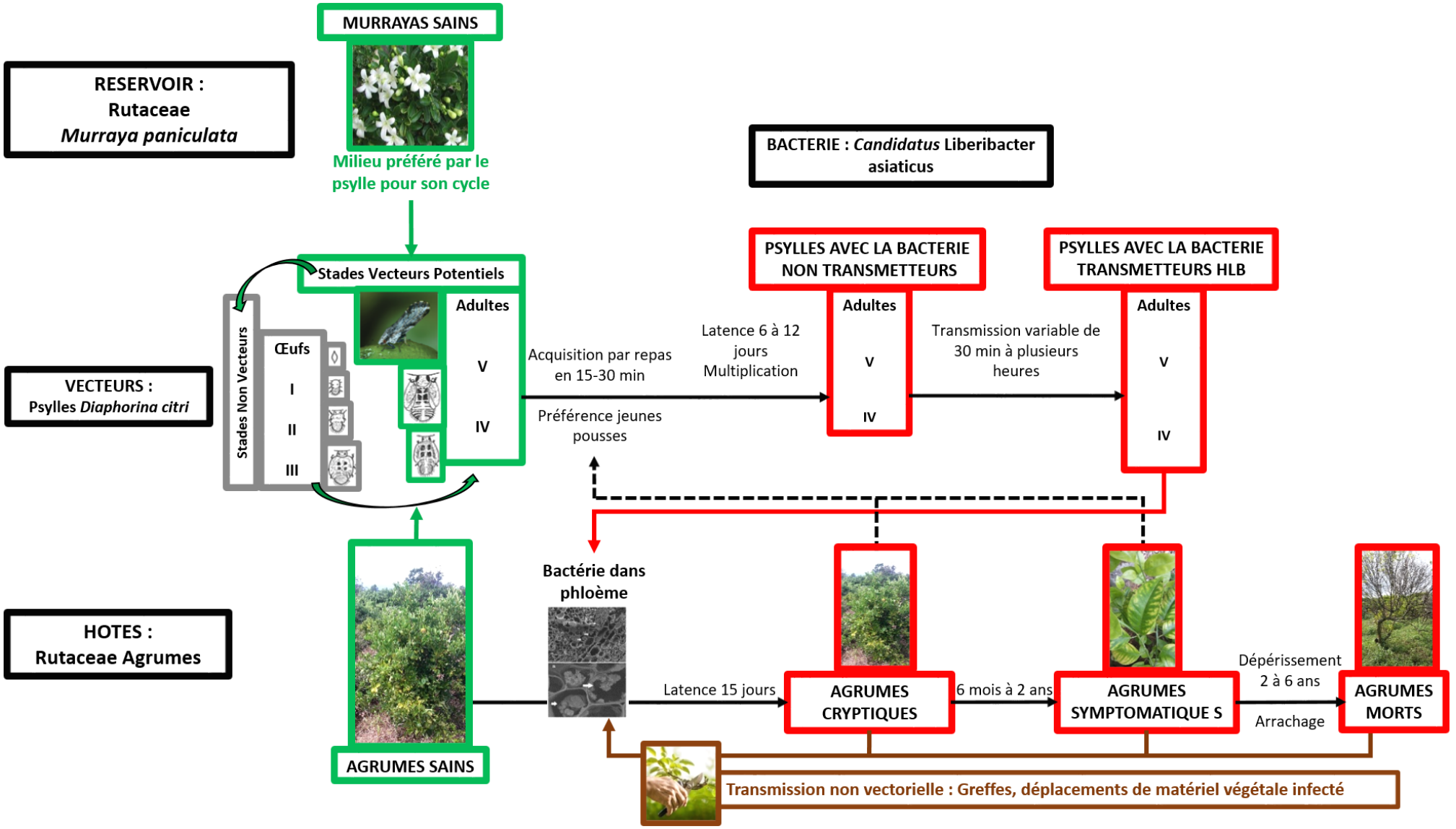

RESERVOIR :
Rutaceae
Murraya paniculata
MURRAYAS SAINS
Milieu préféré par le psylle pour son cycle
BACTERIE : *Candidatus* Liberibacter asiaticus
VECTEURS :
Psylles *Diaphorina citri*
Stades Vecteurs Potentiels
Stades Non Vecteurs
Œufs
I
II
III
Adultes
V
IV
Acquisition par repas en 15-30 min
Préférence jeunes pousses
Latence 6 à 12 jours Multiplication
PSYLLES AVEC LA BACTERIE NON TRANSMETTEURS
Adultes
V
IV
Transmission variable de 30 min à plusieurs heures
PSYLLES AVEC LA BACTERIE TRANSMETTEURS HLB
Adultes
V
IV
HOTES :
Rutaceae Agrumes
AGRUMES SAINS
Bactérie dans phloème
Latence 15 jours
AGRUMES CRYPTIQUES
6 mois à 2 ans
AGRUMES SYMPTOMATIQUE S
Dépérissement 2 à 6 ans
Arrachage
AGRUMES MORTS
Transmission non vectorielle : Greffes, déplacements de matériel végétale infecté

Figure 4 : Schéma récapitulatif des différents compartiments intervenant dans le développement d'une épidémie de HLB avec *D. citri* comme vecteur. Houillon, Pruvost, Ravigné, 2019.

Des expériences en laboratoire et des observations au champ ont permis de mettre en évidence la rapide acquisition de la maladie par le vecteur, après un repas entre 15 et 30 minutes sur un hôte infecté. Une période de latence de 6 à 12 jours est nécessaire pour que la bactérie se soit suffisamment multipliée dans le psylle et pour que celui-ci devienne infectieux. Le psylle est alors capable de transmettre la bactérie lors de repas en sève d'une durée de 30 minutes à plusieurs heures.

Les capacités de dispersion des psylles, notamment de *D. citri,* sont liées à certaines conditions abiotiques. Même si les vents peuvent influencer la direction, le temps et la distance de vol sont fortement corrélés à la température et à la pression atmosphérique (Sétamou *et al*., 2011 ; Martini *et al*., 2018). On peut noter différents types de dispersion de ces vecteurs. Une dispersion courte qui est liée au comportement de recherche des plantes hôtes du psylle, entre 5 et 12 mètres. Les foyers primaires sont principalement situés en bordure de parcelle et agrégés (Bassanezi *et al*., 2005). Les foyers secondaires sont trouvés jusqu'à 70 mètres des foyers primaires. Pour ce qui est de la dispersion longue distance, et notamment entre vergers, avec étapes possibles dans des réservoirs, elle peut être de plusieurs kilomètres (Lewis-Rosenblum et al., 2015).

2.2.3. Hôtes

La gamme d'hôtes du HLB est majoritairement composée d'espèces de Rutaceae. Sur 42 espèces répertoriées seulement huit ne sont pas de cette famille (Rapport expertise collective Anses, 2019). D'après Aubert (1987), les plantes préférées de *D. citri* sont les buis de Chine *Murraya paniculata* et le limettier *Citrus aurantifolia*. Il est néanmoins commun de les trouver sur de nombreuses autres espèces du genre *Citrus* et surtout sur d'autres Rutaceae (Rapport expertise collective Anses, 2019), avec seulement deux espèces d'hôtes n'appartenant pas à cette famille. Chez *T. erytreae*, la gamme des plantes hôtes préférées est plus étendue (Aubert, 1988). Les buissons *Clausena anista* sont particulièrement appréciés (Moran, 1968) ainsi que l'arbuste *Vepris lanceolata*. On note aussi trois espèces de *Citrus* référencées dans les hôtes privilégiés par *T. erytreae*, à savoir *C. limon*, *C. medica* et C. *aurantifolia*. Dans les plantes hôtes communes, on retrouve une majorité de *Citrus* mais aussi *M. paniculata* (Rapport expertise collective Anses, 2019). Les préférences de plantes hôtes diffèrent entre les deux espèces de psylles. Cependant, au sein des Rutaceae, les arbustes de l'espèce *M. paniculata* (buis de Chine) ont un rôle particulier puisqu'ils sont un important réservoir de psylles. L'espèce

Murraya koenigii a aussi un rôle de réservoir mais pourrait par son pouvoir attractif être un moyen de lutte pour éloigner les psylles des agrumes (Beloti *et al*., 2018).

2.3. Un défi pour la surveillance

La surveillance pose de manière générale certaines difficultés. Pour ce qui est des maladies de plantes, Cunniffe *et al*. (2015) ont identifié 13 défis de la modélisation des maladies, qui auront pour but de répondre à des problématiques de surveillance et de contrôle. Parmi ces enjeux, le défi de saisir la structure spatiale des hôtes est évoqué. Bien que les plantes soient non mobiles, accéder à la répartition des plantes hôtes dans un paysage n'est pas si facile. En fait, la distribution est souvent estimée du fait de la grande échelle géographique à prendre en compte ou de l'inaccessibilité de certaines zones. Ainsi les données de localisation sont souvent incomplètes et peu précises, et l'enjeu est de pouvoir évaluer l'impact de cette incomplétude sur la répartition estimée par rapport à la répartition réelle. De plus, ce constat se fait sans prise en compte de la dynamique que peuvent avoir ces structures spatiales. Or cette dynamique a probablement une influence sur la dynamique de la maladie. Par exemple dans le cas du champignon phytoparasite *Microbotryum violaceum*, Carlsson-Granér et Thrall (2002) ont montré que la dynamique de la répartition spatiale de l'hôte *Lychnis alpina* influence la dynamique de la maladie et la variation de la résistance. Un autre enjeu de la surveillance des maladies de plantes est d'améliorer les méthodes de détection devant le nombre d'agents phytopathogènes. La modélisation est notamment l'un des outils mis en avant pour répondre à cette problématique. Il est par exemple possible par un modèle épidémique simple d'estimer l'incidence d'une maladie émergente et donc de faire de la détection précoce (Parnell *et al*., 2012). De même, les facteurs expliquant la propagation d'une épidémie peuvent être mis en évidence par des analyses de sensibilité de modèles épidémiologiques. Par exemple, dans le cas de la sharka, la principale virose des *Prunus*, la surveillance des parcelles les plus connectées est un des paramètres à cibler pour une meilleure gestion de la maladie (Rimbaud *et al*., 2018).

Dans le cas particulier de la surveillance du HLB, une première difficulté est liée à l'expression de la maladie. D'une part, la phase de latence, c'est-à-dire le délai entre la contamination d'un arbre et le moment où les psylles qui le piquent peuvent commencer à acquérir la bactérie de façon efficace, est courte (15 jours). Donc les arbres infectés deviennent infectieux très vite. D'autre part, initialement les bactéries colonisent l'arbre sans provoquer de symptômes visibles. Cette phase asymptomatique peut être longue (de 6 mois à 2 ans) (Fig.4). De plus, lorsque des symptômes foliaires apparaissent finalement, il est facile de les confondre avec des carences nutritives ou des infections par d'autres agents pathogènes comme le virus de la Tristeza. Les fruits asymétriques sont plus distinctifs mais ils

apparaissent tardivement. Il faut aussi souligner que la symptomatologie varie fortement entre espèces et variétés d'agrumes. Selon Miles et coll. (2017), les variétés les moins affectées sont celles avec une partie du génome de *Citrus medica*, comme par exemple *Citrus limettioides* (le limettier doux). En revanche, des espèces comme *Citrus reticulata* Blanco (le mandarinier) présente une tolérance générale faible à la maladie. L'identification visuelle ne pouvant pas conduire à un diagnostic sûr, la détection passe par un test moléculaire. Il existe différentes possibilités. Actuellement la méthode de détection officielle est la PCR en temps réel (DGAL/SDSPV/2021-807, 2021 ; ANSES/LSV/MA063, 2021). Or cette méthode a un coût non négligeable en temps et en argent. Des efforts sont mis en œuvre pour le développement de nouvelles méthodes de détection moins chères et plus rapides. C'est par exemple le cas de la détection par l'odorat canin (Gottwald *et al*., 2020). Bien que cette méthode soit très prometteuse, notamment en termes de temps avec environ 2 secondes par arbre, elle reste encore au stade expérimental. La méthode de détection par amplification isotherme en boucle (LAMP) a aussi été testée pour détecter *CLas*. Bien que les résultats soient encourageants en termes de sensibilité et de rapidité (Choi *et al*., 2018), la méthode PCR en temps réel est privilégiée car elle a été évalué comme moins coûteuse (Cellier *et al*., 2019).

Une deuxième difficulté est de réussir à prendre en compte l'aspect vectoriel de la maladie. En effet, les populations d'insectes vecteurs et leurs dynamiques ont une influence directe sur la propagation de la maladie mais sont difficiles à estimer. Les plantes hôtes des psylles vecteurs se retrouvent aussi en dehors des zones de cultures. Par exemple, le buis de Chine est présent sur tout le territoire réunionnais comme plante ornementale, et est un des hôtes privilégiés du vecteur *D. citri* qui peut influencer la dispersion de ce dernier (Tomaseto *et al*., 2015).

3. L'agrumiculture à la Réunion

La Réunion est une île de l'océan Indien située à l'Est de Madagascar. Administrativement, ce territoire est un département et une région française d'outre-mer. Ses 24 communes sont réparties sur 2500 km^2 de superficie. Malgré cette relative faible surface, il existe une diversité de conditions climatiques à la Réunion. Cette diversité s'explique notamment par les reliefs de l'île dus à l'activité volcanique ayant formé le piton des Neiges (3071 mètres, plus haut sommet de l'océan Indien), ainsi que trois cirques au cœur de l'île (Cilaos au sud, Mafate à l'ouest et Salazie à l'est, Fig.5 A). Ces reliefs participent à séparer l'île en deux grandes zones par la diagonale Nord-Ouest / Sud-Est. A l'est de cette diagonale se trouve la zone au vent plus humide et de l'autre côté se trouve la zone sous le vent, plus sèche en moyenne et protégée des fortes intempéries (Fig.5 B). Les plus hautes températures se

retrouvent sur les littoraux. Dès que l'altitude augmente et que l'on se trouve au centre de l'île, les températures diminuent (Fig.C 5).

L'organisation des cultures à la Réunion est un héritage du système économique de la plantation, par lequel la métropole a historiquement imposé une culture industrielle dominante dans chacune de ses colonies (d'abord le café puis la canne à sucre). Cette culture de plantation a gardé sa dominance dans le paysage agricole jusqu'à nos jours. La canne représente une surface de près de 23000 ha, c'est-à-dire 54% de la surface agricole utile (Agreste, 2019). Mais depuis la départementalisation en 1946, il y a eu une volonté des politiques publiques de s'éloigner du système économique de la plantation et de promouvoir une diversification des productions agricoles. Résultant de la crise sucrière des années 60 et de la réforme agraire, la culture de l'agrume s'est développée à la Réunion, et notamment à Petite Ile. Bien qu'elle ne soit pas une culture majoritaire comme la canne à sucre (selon la statistique agricole, elle ne représente que 300 ha de surface cultivée), elle présente un fort intérêt patrimonial localement. En effet, à la Réunion plus de 25 variétés d'agrumes différentes sont cultivées, dont certaines sont emblématiques de l'île (par exemple les tangors, combavas, et citrons quatre saisons). L'organisation de la culture d'agrumes en filière à la Réunion est encore minoritaire. Bien que depuis les années 2000, les politiques publiques encouragent les producteurs à se regrouper au sein de coopératives, seulement 30% des producteurs de fruits et légumes sont affiliés (Agreste, 2019) et il est probable que pour les producteurs d'agrumes la part d'affiliés soit moindre (Dupré et al., 2017). La production est très majoritairement orientée vers la consommation locale, notamment parce que les règles de quarantaine en vigueur interdisent l'exportation d'agrumes vers l'Europe. La distribution se fait encore beaucoup par des détaillants locaux ou dans les marchés (Dupré et al., 2017). Les exploitants d'agrumes forment une population très diverse, avec peu d'exploitants spécialisés sur cette culture et de nombreux exploitants pour qui l'agrume est une culture secondaire, de rente, qui offre un complément de revenu sans demander d'investissement trop important. Les surfaces cultivées en agrumes se répartissent tout autour de l'île et dans les cirques, sous la forme d'une myriade de parcelles de très petite surface (moins d'un hectare), du niveau de la mer à près de 1300 m d'altitude. C'est donc un parcellaire très fragmenté et très hétérogène.

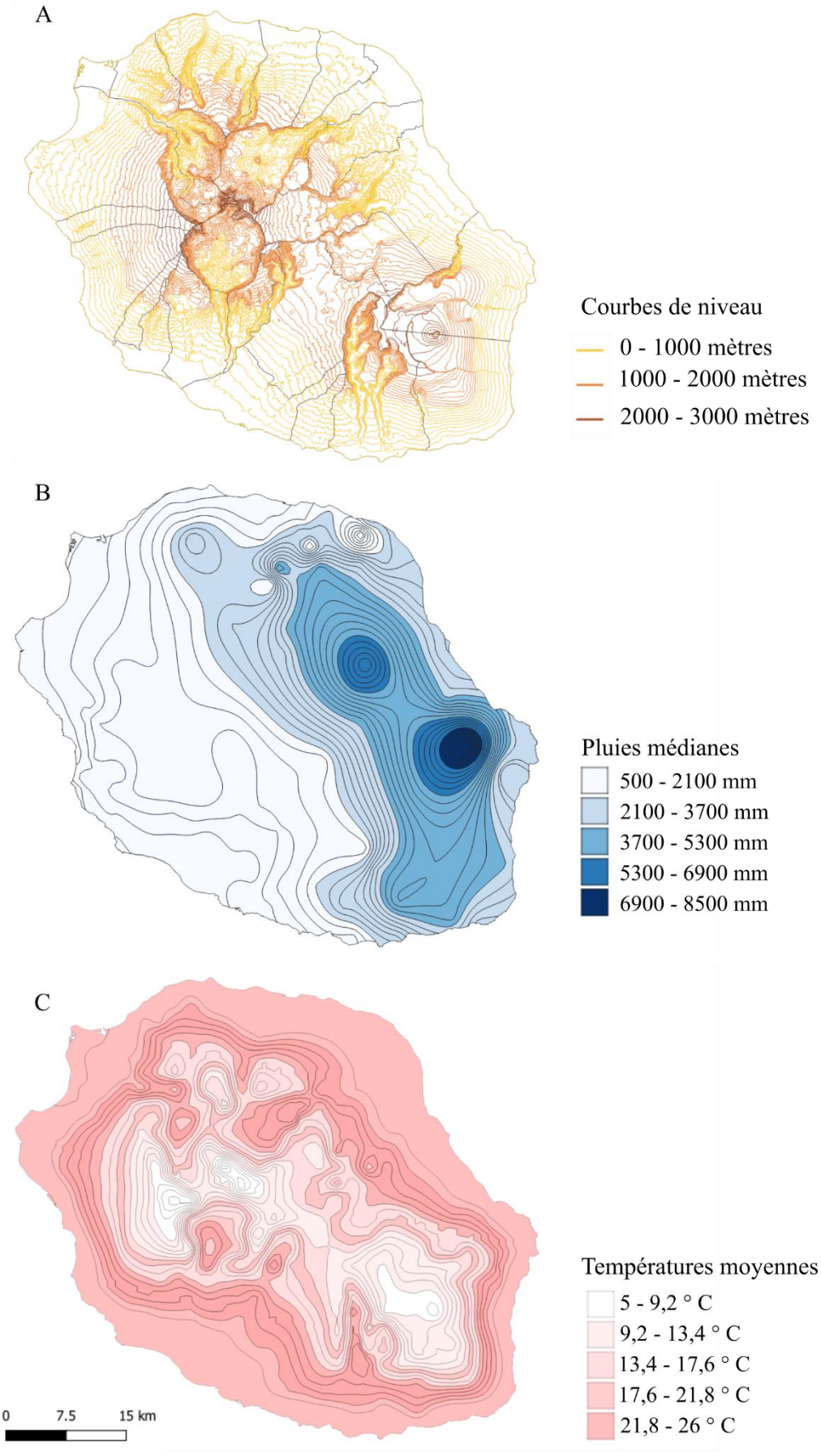

A
Courbes de niveau
0 - 1000 mètres
1000 - 2000 mètres
2000 - 3000 mètres
B
Pluies médianes
500 - 2100 mm
2100 - 3700 mm
3700 - 5300 mm
5300 - 6900 mm
6900 - 8500 mm
C
Températures moyennes
5 - 9,2 ° C
9,2 - 13,4 ° C
13,4 - 17,6 ° C
17,6 - 21,8 ° C
21,8 - 26 ° C
0
7.5
15 km

Figure 5 : Conditions éco-climatiques observées à la Réunion. (A) Reliefs. Les lignes de couleur représentent les courbes de niveau (isoclines). Le dégradé de couleur représente, du plus clair au plus foncé, les altitudes de 0 à 3000 mètres. Les lignes noires représentent les délimitations des communes. (B) Pluviométrie. Les polygones représentent des bandes isométriques des médianes des niveaux de pluviométrie annuelles sur 30 ans. (C) Températures. Les polygones sont les isothermes des températures annuelles moyennes sur 30 ans. Ces cartes sont des adaptations de couches d'information géographiques disponibles sur le catalogue de données géographiques AWARE (Atlas Web Agricole pour la Recherche) (https://aware.cirad.fr).

4. Le HLB à la Réunion

4.1. Une première épidémie considérée comme éradiquée

Une première épidémie de HLB a eu lieu à la Réunion dans les années 1970-1980 (Gottwald, 1989) en lien avec la présence de deux espèces de HLB (*C*L*as* et *C*L*af*) et des deux espèces vectrices *T. erytreae* et *D. citri*. Pour lutter contre la maladie, des produits pesticides et antibiotiques ont été utilisés. De plus les plants malades ont été arrachés en nombre. Des plants sains ont été fournis aux producteurs (Aubert *et al*., 1996). Des parasitoïdes des psylles ont été introduits en 1974 et 1978 (Aubert et Quilici, 1984). Grâce à l'absence de parasite secondaire, *Tamarixia dryi* et *Tamarixia radiata* ont effectivement parasité *T. erytreae* et *D.citri* respectivement (Aubert et Quilici, 1984). Les populations de psylles ont diminué dans les vergers mais également en dehors, par exemple sur *M. paniculata* (Aubert et Quilici, 1984). Ces mesures ont conduit semblait-il à la disparition de *T. erytreae* et une forte régulation de *D. citri*. La zone de production majeure d'agrumes à la Réunion, Petite-Île, a d'ailleurs été inspectée avec 0,5 % des 6115 arbres regardés ayant des symptômes semblables au HLB (Aubert *et al*., 1996).

4.2. Une nouvelle épidémie encore en cours

Depuis 2015, de nouveaux cas de HLB ont été observés sur l'île (BSV, 2016). C'est essentiellement *D. citri* qui est observée. Les parasitoïdes sont toujours présents, aucune pullulation de ces psylles n'est relevée. Seulement quelques individus de *T. erytreae* ont été trouvés dans les dernières années malgré des recherches actives (Bernard Reynaud, comm. pers.). Au départ de cette épidémie, très peu d'éléments étaient connus notamment sur la souche bactérienne en question et sa provenance. Il était en effet difficile de savoir s'il s'agissait d'une réémergence, d'une importation ou de vieux foyers en dormance jamais vraiment éradiqués. A l'heure actuelle, seules les souches *C*L*as* sont considérées présentes à la Réunion (Gilles Cellier, comm. pers.) et, sur la base d'études de la diversité moléculaire

des populations bactériennes, l'hypothèse d'une réémergence à partir de vieux foyers semble la plus probable (Olivier Pruvost, comm. pers.).

Pour ce qui est des hôtes des psylles, en plus des agrumes cultivés, *M. paniculata* est répandue à la Réunion car il a un usage culturel lors de la fête des Rameaux. S'ajoute à cela que les agrumes ne sont pas rares en dehors du paysage agricole, avec des nombreux particuliers qui en possèdent dans leur jardin.

4.3. Une organisation originale de la surveillance

Dès 2015, un dispositif de surveillance du HLB à la Réunion a été mis en place et animé par la DAAF (Direction de l'alimentation, de l'agriculture et de la forêt), sous l'égide de la DGAL (Direction Générale de l'Alimentation). Etant considérés comme Organisme de Quarantaine Prioritaire d'après le Règlement UE 2016/2021, mais absents du continent, les vecteurs et les bactéries pathogènes, ne sont pas soumis à un plan de surveillance défini à cette échelle. Le HLB est un organisme réglementé par un arrêté préfectoral (N°2012-/1083/SG/DAAF) à la Réunion. Il a été décidé d'effectuer une Surveillance des Organismes Réglementés Emergents pour le HLB car présent à la Réunion en attendant l'établissement d'un véritable statut.

Par comparaison avec d'autres réseaux de surveillance en Europe, le dispositif de surveillance du HLB à la Réunion présente la caractéristique d'être de très petite taille et très autonome. L'USV (Unité Santé des Végétaux) de la DAAF établit les plans de surveillance et anime le réseau. La FDGDON (Fédération Départementale des Groupements de Défense contre les Organismes Nuisibles) fait office d'OVS (Organisme à Vocation Sanitaire), en charge de la réalisation des prélèvements de terrain, et de laboratoire agréé au travers de sa section dédiée, la Clinique du Végétal, en charge de la réalisation des tests de détection moléculaire. Le laboratoire RAPT (Ravageurs et Agents Pathogènes Tropicaux) de l'ANSES (Agence Nationale de SÉcurité Sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail) est le LNR (Laboratoire National de Référence) dédié, vient en appui sur les méthodes de détection et de prélèvement. Pour édifier sa stratégie de surveillance et l'ajuster en fonction des données déjà acquises, la DAAF se dote d'un Comité de Pilotage (COPIL) qui rassemble les principaux acteurs locaux de la filière agrumes et de la recherche. Parmi ces participants sont présents :

- La **DAAF** (direction de l'alimentation, de l'agriculture et de la forêt) établit les plans de surveillance avec l'appui des autres organismes, commandite la prise de mesures pour la gestion du HLB en faisant notamment des propositions d'arrêtés préfectoraux. Ce sont

également des agents de la DAAF qui sont chargés du suivi de la destruction des plants contaminés (Le Préfet de la Réunion, 2016).

- La **FDGDON** (fédération départementale des groupements de défense contre les organismes nuisibles) obtient une délégation et des financements de la DAAF pour effectuer les prélèvements officiels de matériel végétal et procéder aux tests officiels de détection de la présence de la maladie avec sa Clinique du Végétal.

- La **Chambre d'agriculture** a pour rôle de conseiller les agriculteurs, par exemple en leur proposant des alternatives à la culture d'agrumes dans les zones où la maladie est très présente et en donnant des conseils de prophylaxie partout.

- L'**Armeflhor** (association réunionnaise pour la modernisation de l'économie fruitière, légumière et horticole) est un centre technique d'expérimentation en fruits, légumes et horticulture. Elle est chargée de fournir, avec l'aide du CIRAD, des plants sains certifiés CAC (conformité agricole communautaire), cultivés sous serres rendues imperméables aux insectes. Elle forme également des pépiniéristes à produire ces plants sains.

- L'**Anses** (Agence Nationale de SEcurité Sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail), au travers de l'unité Ravageurs et agents pathogènes tropicaux du Laboratoire de la santé des végétaux (LSV-RAPT) est laboratoire national de référence (LNR) pour la détection du HLB (mandat Bactéries sur bananier, agrumes et plantes tropicales). A ce titre, l'unité LSV-RAPT est en charge du développement et de l'évaluation/validation de méthodes d'analyses. Elle assure également le transfert des méthodes d'analyses validées et officialisées au réseau de laboratoires agréés par le ministère en charge de l'agriculture et réalise les analyses de seconde intention (analyses de confirmation);

- Le **CIRAD** (Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement) avec son UMR PVBMT (unité mixte de recherche peuplements végétaux et bioagresseurs en milieu tropical) est en charge des aspects de recherche autour de la biologie des systèmes impliqués (bactéries et psylles), de l'élaboration des plans d'échantillonnage ou de la mise au point de nouvelles méthodes de détection.

- L'**Arifel** (Association Réunionnaise Interprofessionnelle des Fruits et Légumes) a pour objectif d'organiser en filière la production et la vente de légumes et de fruits à la Réunion.

Chacun des acteurs en jeu n'est représenté que par une à trois personnes, dont les missions sont multiples au sein du système de surveillance du HLB (Fig.6), mais aussi dans la surveillance d'autres maladies de plantes à la Réunion.

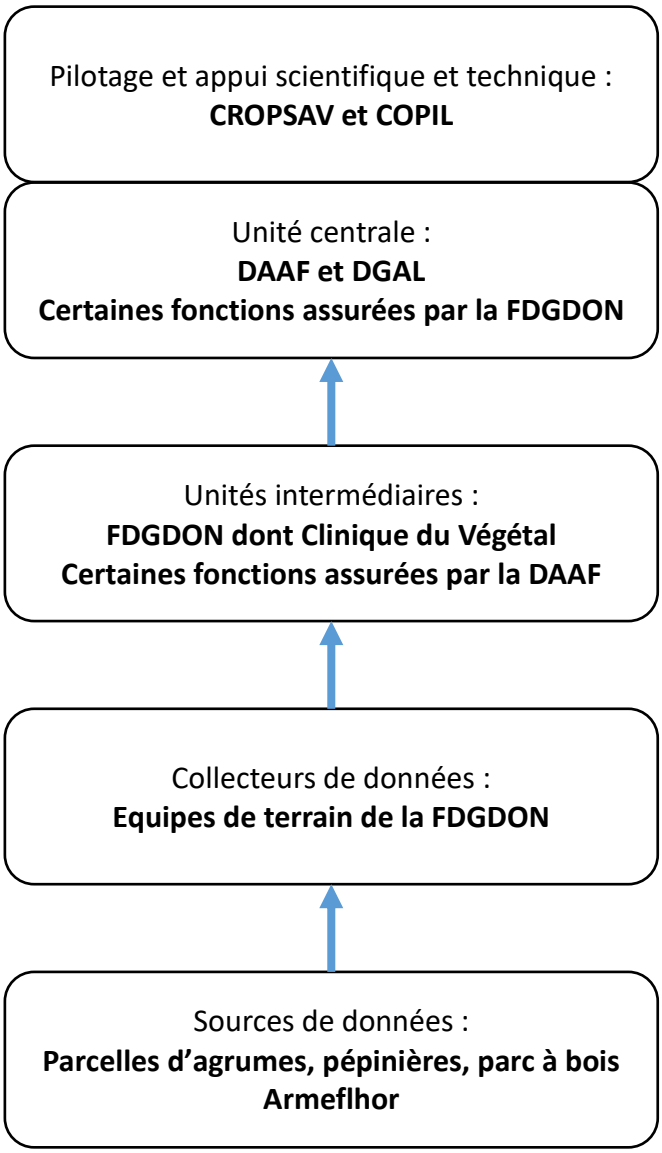


Figure 6 : Organisation de la surveillance du HLB à la Réunion selon les fonctions définies par la méthode OASIS. Les flèches symbolisent la remontée des données.

Le plan de surveillance, ses ajustements éventuels ainsi que des options de gestion en découlant sont ensuite examinés et entérinés lors des CROPSAV (conseils régionaux d'orientation de la politique sanitaire animale et végétale), qui rassemblent les acteurs du monde agricole et les collectivités territoriales.

4.4. Une stratégie de surveillance en évolution

Ce plan de surveillance repose sur l'échantillonnage par prélèvement de feuilles et à l'analyse en laboratoire de la présence d'ADN bactérien par PCR. Le nombre de parcelles échantillonnées est une commande de la DAAF à la FDGDON encadrée par une convention de surveillance planifiée. Ce nombre est un équilibre entre les objectifs de la surveillance et les capacités de traitement de la FDGDON. Le protocole de prélèvement (le choix des arbres dans une parcelle expertisée) et le choix des parcelles expertisées ont varié au cours du temps. Il sera d'ailleurs pertinent d'analyser l'impact de cette évolution. La méthode de diagnostic utilisée par le laboratoire agréé est la méthode officielle. De 2015 à 2021, il s'agissait d'une PCR conventionnelle, appropriée à l'identification des trois souches bactériennes (MOA033 version 1b, ANSES, 2014). La méthode officielle de diagnostic a aussi été modifiée l'année dernière pour se tourner vers le PCR en temps réel (q-PCR) (MA063 version 1, ANSES, 2021). Cette nouvelle méthode vise notamment un gain de sensibilité dans les analyses.

Au début de la crise, il y a eu une évolution significative du protocole d'échantillonnage, notamment à partir de l'année 2018. De 2015 à 2017, l'objectif était de confirmer la présence de foyers de HLB à la Réunion et le nombre de parcelles visitées par an ne dépassait pas 30 (Tab.1).

Tableau 1 : Historique des différents plans d'échantillonnage de 2015 à 2017.

Année	Nombre de parcelles	Prélèvements (15 feuilles) par parcelles	Zones géographiques	Etat HLB
2015	12	0 à 4	Petite-Île, Salazie , Saint-Pierre, les Avirons	4 positifs à Petite-Île
2016	30	2 à 5	Tour de l'île	11 positifs dont Saint-Pierre et Saint-Benoit
2017	30	5	Transects altitudinaux à Petite-Île et Saint-Benoit	12 positifs dont Entre-Deux et Saint-Joseph

A partir de 2018, le protocole d'échantillonnage a été adapté à la recherche de zones indemnes. Avec 60 arbres prélevés à l'hectare regroupés par dix arbres, avec 15 feuilles prises par arbre. Le but de ce protocole de prélèvement était d'avoir moins de 5% de chances de ne pas détecter la maladie dans un

verger où la maladie aurait une faible fréquence. Dans cette même période, les acteurs se sont mis d'accord pour que la moitié des parcelles échantillonnées soient issues de la liste des parcelles les plus connectées, jugées comme plus à risque (Tab.2). C'est une première ébauche de surveillance basée sur le risque, bien que celle-ci repose sur des connaissances théoriques sur la circulation des épidémies plus que sur une estimation du risque à partir de données.

Tableau 2 : Historique des différents plans d'échantillonnage de 2018 à 2020.

Année	**Nombre de parcelles**	**Prélèvements (15 feuilles) par parcelles**	**Zones géographiques**	**Etat HLB**
2018	100	60 arbres/hectare avec regroupement par 5 ou 10 arbres pour le test moléculaire (G. Cellier, A. Chabirand)	Zones supposées indemnes (Saint-Paul, Salazie, le Tampon)	2 positifs dont 1 à l'entrée de Salazie
2019	100	Idem 2018	Parcelles non visitées et/ou à forte connectivité. Efforts sur Saint-Paul et Saint-Benoît	Des positifs à Petite-Île, le Tampon, Saint-Joseph, l'Entre-Deux, Saint-Paul, Sainte-Suzanne et Saint-Benoît
2020	100	Idem 2018	Parcelles à forte connectivité et en voisinage de parcelles positives.	1 positif détecté au Tampon

Les changements de méthodes dans le plan de surveillance ainsi que son organisation institutionnelle seraient pertinents à analyser pour mesurer les impacts sur l'efficacité du système de surveillance. Une évaluation du dispositif de surveillance par la méthode OASIS développée par un groupe de travail de l'Anses est adaptée à cette analyse (Hendrikx *et al*., 2011). Par une série d'entretiens des acteurs et l'attribution de notes avec concertation des différents échelons, le groupe d'étude peut ainsi proposer une série de recommandations adaptées au système de surveillance.

4.5. Un contexte compliqué

Le contexte dans lequel opère le dispositif de surveillance est tendu. En effet, les acteurs de ce dispositif de surveillance du HLB sont les mêmes à assurer la surveillance des autres maladies et ravageurs de plantes sur le territoire réunionnais. Par exemple, ce sont les mêmes personnes qui doivent gérer les problèmes causés par la mouche des fruits *Bactrocera dorsalis*, notamment sur la production de mangues. Dans l'unité centrale, trois personnes sont identifiées pour assurer ce travail, ce qui est insuffisant. La majorité du travail sur le terrain est donc déléguée à l'unité intermédiaire, ce qui coupe l'unité centrale du terrain.

De plus, dans le cadre de la surveillance du HLB, la connaissance du parcellaire agrumicole est nécessaire à la planification. Or cette connaissance était limitée aux déclarations faites dans le cadre de demandes d'aides (PAC) et ne couvrait qu'une faible partie du parcellaire total. Cette situation révèle un besoin de mieux connaitre la répartition géographique des plantes hôtes afin de conduire une surveillance qui ait du sens.

S'ajoute à cela, le fait que la lutte consiste en l'arrachage des arbres identifiés contaminés, ce qui entraine une perte économique pour le propriétaire. Et comme ces campagnes d'arrachage sont adossées aux résultats de la surveillance, les producteurs locaux sont réticents à accepter des inspections de leurs vergers. Ainsi, la communication autour de la surveillance de la maladie et de son organisation revêt une importance dans le contexte de réémergence du HLB.

5. Problématiques scientifiques

Traditionnellement, la recherche peut, en appui à la surveillance, consolider les connaissances biologiques de base (hôtes, vecteurs, biologie de la maladie, …), et contribuer à améliorer les méthodes de diagnostic. La recherche peut aussi mettre en évidence l'intérêt de l'optimisation de la surveillance en elle-même. Par exemple, dans le cas du *Plum pox virus* responsable de la sharka, il a été montré que la surveillance des pépinières et des vergers a un impact sur la gestion de la maladie et qu'il existe donc un intérêt à une bonne surveillance et une prise en charge rapide des arbres malades pour minimiser les dégâts (Rimbaud *et al*., 2019). Pour le même pathosystème, le paysage et de son agrégation sont des connaissances importantes pour une surveillance et une gestion efficace (Picard *et al*., 2019).

Par tous les éléments expliqués précédemment, nous avons vu à quel point le HLB pose un défi délicat aux acteurs de la surveillance à la Réunion. Pour ce dispositif, il est complexe de savoir comment

optimiser la surveillance, car les particularités du système biologique, de l'environnement et du contexte sociologique et administratif en font un cas très différent de ceux traités dans la littérature. Le territoire restreint avec des paysages hétérogènes et fragmentés, la faible quantité de données disponibles et la charge de travail qui repose sur les quelques acteurs en font un système assez éloigné des systèmes industriels comme celui de la Floride par exemple, où de grands vergers industriels de plusieurs dizaines d'hectares bénéficient d'échantillonnages nombreux et répétés soutenus par un effort financier conséquent. Dans le même temps, cette situation de parcellaire morcelé et de pauvreté des données, est sans doute exemplaire de ce que l'on peut attendre de nombre de cultures secondaires ou implantées dans des territoires moins administrés que l'Europe continentale. Aussi dans cette thèse j'aborderai la question suivante :

Est-il possible d'améliorer la surveillance du HLB à la Réunion en tenant compte des spécificités de ce système et en les exploitant ?

J'aborderai cette question sous deux angles complémentaires : Le premier consiste à s'interroger sur la possibilité de proposer une surveillance basée sur le risque à la Réunion en utilisant la nature très particulière du paysage agrumicole. En effet, les précédentes études de surveillance basée sur le risque s'appliquaient dans des contextes de systèmes de surveillance avec plus de moyens et une plus grande quantité et qualité de données. Par exemple, dans le cas de la surveillance du HLB en Floride, ce sont six cycles d'échantillonnage effectués en deux années. Les vergers sont rectangulaires et d'environ cinq hectares de surface moyenne, avec certains de plus de 200 hectares (Parnell *et al*., 2014). Le paysage contient environ 38000 plants soient plus de 215000 hectares d'agrumes sur un territoire de 170451 km^2. A la Réunion, la densité spatiale d'agrumes environ 10 fois moins importante constitue un paysage agricole très différent. La structure spatiale étant un facteur d'influence sur la surveillance de maladies de plantes, nous pouvons alors nous demander si cette dernière a une influence sur l'épidémie de HLB à la Réunion. Dans ce cas, il devient intéressant de développer la connaissance du parcellaire pour pouvoir étudier la structure spatiale en parallèle des relevés de la maladie. Les deux questions de cet angle d'étude seront donc : **comment améliorer la connaissance du parcellaire et comment le paysage influence l'épidémie.**

Le deuxième angle vise à se demander si les limites du dispositif de surveillance en place sont les mêmes que celles déjà observées dans d'autres dispositifs ou s'il existe des lignes d'amélioration spécifiques à la situation de l'outremer. L'hypothèse de travail de cette partie est que la fragilité apparente du dispositif, qui repose sur un très petit nombre d'acteurs, est aussi une source de créativité et de résilience et une des clés de l'amélioration du dispositif. La question de recherche de

cette partie sera de savoir **comment améliorer le système de surveillance institutionnel du HLB à la Réunion.**

Le manuscrit est structuré autour de trois parties.

- La première, est centrée sur un chapitre d'ouvrage, intitulé : « La surveillance active des menaces phytosanitaires émergentes : le défi de la mise en œuvre opérationnelle », en cours de publication aux Editions Quæ, dans la collection Savoir Faire. L'ouvrage en question sera une monographie technique à usage professionnel consacrée aux crises sanitaires et aux invasions biologiques concernant la santé des végétaux essentiellement. Le chapitre d'ouvrage reproduit dans cette thèse définit la fonction de la surveillance, ses grandes étapes et montre comment la France est organisée pour mener la surveillance des maladies émergentes des plantes.
- La seconde partie sera consacrée à l'utilisation de la connaissance de la structure du parcellaire agrumicole pour l'amélioration des plans de surveillance du HLB à la Réunion. Elle se composera de deux sous parties. Dans la première, je montrerai comment j'ai amélioré la cartographie des agrumes à la Réunion par des méthodes de photo-interprétation et validation sur le terrain, ainsi que des algorithmes d'apprentissage. Ce travail prend la forme d'un « data paper » soumis à un journal à comité de lecture. Dans la deuxième, je montrerai l'utilisation faite de cette cartographie pour inférer les facteurs de risque de présence du HLB à la Réunion. Spécifiquement, les relevés de présence / absence de la maladie seront mis en relation avec la structure du paysage, les variables éco-climatiques et la nature et l'utilisation des sols. Cette partie, qui a fait l'objet de plusieurs rapports d'étudiants, sera présentée comme un document de travail.
- La troisième partie sera dédiée à l'analyse des voies d'amélioration du dispositif de surveillance en lui-même. J'y présenterai une évaluation du dispositif de surveillance à la Réunion que j'ai menée avec un étudiant et un comité d'experts. Elle s'appuie sur la méthode OASIS, que nous avons adaptée au contexte des maladies des plantes à la Réunion. Cette étude a fait l'objet d'un rapport d'étudiant. Elle fera l'objet d'un rapport officiel courant 2022. Mais je la présenterai ici au format article en vue d'une soumission à une revue à comité de lecture.

Enfin, dans une discussion générale, je discuterai de l'apport et des limites de mes études mis en parallèle des objectifs de la thèse. J'ouvrirai par les perspectives d'amélioration de la surveillance et les enjeux des échanges de données entre surveillance et recherche pour finir par m'interroger sur la place de la recherche vis-à-vis de la société dans la surveillance des maladies de plantes.

Avant-propos 1

Le premier chapitre de cette thèse constituera prochainement le chapitre 17 d'un ouvrage Quae à paraître. Il s'intitule « La surveillance active des menaces phytosanitaires émergentes : le défi de la mise en œuvre opérationnelle ». Il sera intégré au sein de 19 autres chapitres, entre un chapitre sur le cadre légal de la gestion des crises sanitaires et un sur la prophylaxie.

Ce chapitre a pour objectif de mettre en lumière la complexité de la surveillance et d'expliciter au plus grand nombre comment elle s'organise. En effet, elle est non seulement un cycle complexe de collecte et de transfert d'informations mais elle est aussi régie par un cadre administratif et légal dense. Les règlementations européennes puis françaises posent un cadre sur la priorisation de la surveillance et la circulation des données. Et c'est au sein de ce cadre que les méthodes statistiques et de modélisation pour la surveillance peuvent se développer. Avant de pouvoir parler d'optimisation de la surveillance, il faut donc comprendre sa place et son applicabilité. En France, ce contexte peut relever d'un mille-feuilles institutionnel. De plus, ce contexte institutionnel peut varier en fonction des filières, des pathosystèmes et des régions. Cette situation présente un défi de coordination d'acteurs et de cheminement des données. C'est dans cette optique que sept organismes publics et privés se sont associés pour former la plateforme d'Épidémiosurveillance en Santé Végétale (Convention Cadre, 2018).

CHAPITRE 1 : La surveillance active des menaces phytosanitaires émergentes

La surveillance active des menaces phytosanitaires émergentes : le défi de la mise en œuvre opérationnelle

Lucie Michel[1], Marie Grosdidier[1], Ismaël Houillon[2,3,4], Virginie Ravigné[2]

Affiliations :

[1] INRAE, UR BioSP, Equipe OPE (Plateforme ESV), Avignon, France

[2] CIRAD, UMR PHIM, F-34398 Montpellier, France.

[3] INRAE, UR BioSP, Avignon, France

[4] ANSES, Laboratoire RAPT, Saint-Pierre, Réunion

1. Introduction

Connaître finement l'état sanitaire des cultures est un prérequis fondamental pour une lutte efficace et respectueuse de l'environnement. Cette connaissance peut s'acquérir par la surveillance épidémiologique : la collecte systématique et continue de données sur l'état sanitaire des plantes, leur interprétation et la diffusion de ces informations dans des délais appropriés à ceux qui en ont besoin pour la mise en œuvre des mesures de gestion (Last, 2001). En principe, la surveillance épidémiologique s'intéresse à tous types de problèmes phytosanitaires. Selon que l'organisme nuisible est encore absent du territoire, tout juste détecté ou bien installé, et selon sa biologie (ex : maladies infectieuses vs. plantes adventices envahissantes), le cadre légal définissant l'organisation de la surveillance pourra varier (voir chapitre 16), mais les principes restent. Ici nous aborderons surtout le cas d'organismes non fermement installés sur le territoire, c'est-à-dire émergents.

La surveillance est en soi un défi méthodologique. Une surveillance efficace repose sur des stratégies d'échantillonnage permettant de minimiser le risque de ne pas détecter l'organisme cible. Mais les espaces à surveiller sont vastes et hétérogènes. En plus des parcelles agricoles, certains bioagresseurs évoluent dans des compartiments naturels du paysage agricole (réservoirs) (voir chapitre 18), d'autres circulent via les masses d'air, les cours d'eau, les transports de marchandises. Par ailleurs, les bioagresseurs peuvent être difficiles à détecter. Certains sont reconnaissables sans outillage, comme par exemple la légionnaire d'automne (*Spodoptera frugiperda*), un papillon ravageur du maïs. D'autres ne peuvent être diagnostiqués sans test moléculaire (voir chapitre 7). C'est le cas par exemple du HuanglongBing (ci-après HLB), une maladie bactérienne des agrumes, dont les symptômes peuvent aisément être confondus avec des carences nutritives ou un manque d'irrigation (Aubert, 1988). Enfin, les bioagresseurs de cultures sont nombreux. La surveillance pose dès lors un défi logistique où l'allocation des ressources humaines et financières doit être optimisée (voir chapitre 15).

Depuis quelques années, des travaux de recherche en épidémiologie, largement basés sur de la modélisation, ont permis un changement de paradigme dans la mise en place de la surveillance. Dans un article fondateur, Parnell *et al*. (2014) propose de concentrer les efforts d'échantillonnage sur les zones du paysage associées au plus fort risque de propagation de la maladie et applique cette méthode au HLB en Floride. Cette approche, appelée surveillance basée sur le risque, est de plus en plus utilisée pour concevoir des stratégies de surveillance et de gestion, comme par exemple pour la bactérie « tueuse de l'olivier », *Xylella fastidiosa* (ci-après *Xf)* (voir chapitre 14), dans le sud de la France (Martinetti et Soubeyrand 2018). Dans le cas de la maladie de la mort subite du chêne en Californie, la modélisation basée sur le risque a servi d'appui à la gestion des forêts (Cunniffe *et al*., 2016). Prometteuse, cette stratégie requiert de mobiliser des connaissances importantes en amont sur la

biologie des bioagresseurs et la structure du paysage agricole, ce qui nécessite de faire dialoguer les chercheurs (en biologie, épidémiologie, statistiques) et les nombreux agents en charge de la surveillance.

L'organisation de ce dialogue entre la recherche et les praticiens de la surveillance ainsi que la résolution des défis techniques associés à chaque étape de sa mise en œuvre (diagnostic, conception des plans de surveillance, collecte des données, analyse et interprétation, diffusion des connaissances) sont depuis peu pris en charge en France par la Plateforme d'Épidémiosurveillance en Santé Végétale (Plateforme ESV, Encadré 1).

Dans ce chapitre, nous présenterons les différentes étapes de la mise en œuvre opérationnelle de la surveillance (Figure 1) et montrerons comment la France s'est organisée pour les réaliser. Ces étapes comprennent la définition des organismes à surveiller au travers de la veille sanitaire, la mise en place de plans de surveillance et de la réglementation associée, la prise de données (inspections, prélèvements, analyses laboratoires) et leur analyse, ainsi que l'utilisation de ces résultats (diffusion et décisions de gestion). Nous nous appuierons beaucoup sur quelques modèles biologiques, actuellement traités par la Plateforme ESV et qui servent de pilotes pour l'amélioration de la surveillance en France (Encadré 1).

Encadré 1 : La Plateforme ESV.

Plateforme ESV

Épidémiosurveillance Santé Végétale

La **Plateforme ESV** créée en 2018 comprend actuellement sept partenaires publics et privés (DGAl, ACTA, Anses, APCA, CIRAD, INRAE, FREDON France) formant le premier réseau dédié à la surveillance de la santé végétale en France.

La Plateforme ESV complète un ensemble tripartite aux côtés de la santé animale et de la sécurité de la chaîne alimentaire. La Plateforme ESV veille à l'efficience de la surveillance épidémiologique en santé végétale. Elle couvre potentiellement tout phénomène ayant ou pouvant avoir un impact négatif sur l'état sanitaire des végétaux et les effets non intentionnels des pratiques agricoles sur l'environnement. Ses membres, principaux acteurs de la surveillance (collecteurs de données, laboratoires d'analyses, instituts de recherche, organismes de politiques publiques, représentants des filières et des professionnels) s'engagent à **évaluer et améliorer la surveillance de l'état sanitaire des végétaux**. Cet enjeu nécessite de travailler sur la compréhension des causes des problèmes sanitaires, de favoriser les interactions entre acteurs et de produire des informations et synthèses fiables et validées sur la situation épidémiologique. C'est un appui méthodologique et opérationnel aux responsables des dispositifs de surveillance.



Le **nématode du pin** *Bursaphelenchus xylophilus* est un ver microscopique qui parasite principalement les pins, transmis par des insectes vecteurs du genre *Monochamus* (en Europe *Monochamus galloprovincialis*). Il peut conduire à l'apparition de symptômes plus ou moins sévères, allant jusqu'à la mort des arbres. Actuellement, il est encore absent du territoire français.



Après avoir ravagé les vergers d'agrumes de Guadeloupe et de Martinique, le **Huanglongbing** (HLB) réémerge à la Réunion depuis 2012. Si la maladie est causée par trois espèces bactériennes du genre *Candidatus* Liberibacter, potentiellement vectées par plusieurs espèces de psylles, c'est la souche bactérienne *Ca.* L. asiaticus et le psylle *Diaphorina citri*, qui causent ces épidémies françaises. Le HLB est une maladie incurable qui conduit à la mort des arbres touchés.



Xylella fastidiosa (*Xf*) est une bactérie phytopathogène actuellement en émergence dans le sud de l'Europe et dont l'ensemble des insectes vecteurs n'est pas encore clairement identifié. *Xf* empêche la plante de s'alimenter en gênant les mouvements de la sève brute, entraînant le dépérissement et la mort de la plante infectée. *Xf* est une bactérie extrêmement polyphage, capable d'infecter plus de 500 plantes hôtes[1]. Elle est présente en France depuis 2015.

[1] Costa H.S., Raetz E., Pinckard T.R., Gispert C., Hernandez-Martinez R., et al. 2004. Plant hosts of *Xylella fastidiosa* in and near Southern California vineyards. *Plant Dis.* 88:1255–61 - https://efsa.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.2903/j.efsa.2020.6114 - Denancé N., Legendre B., Briand M., Olivier V., de Boisseson C., Poliakoff F., Jacques M.-A. 2017. Several subspecies and sequence types are associated with the emergence of *Xylella fastidiosa* in natural settings in France. Plant Pathol 66:1054–1064. DOI:10.1111/ppa.12695

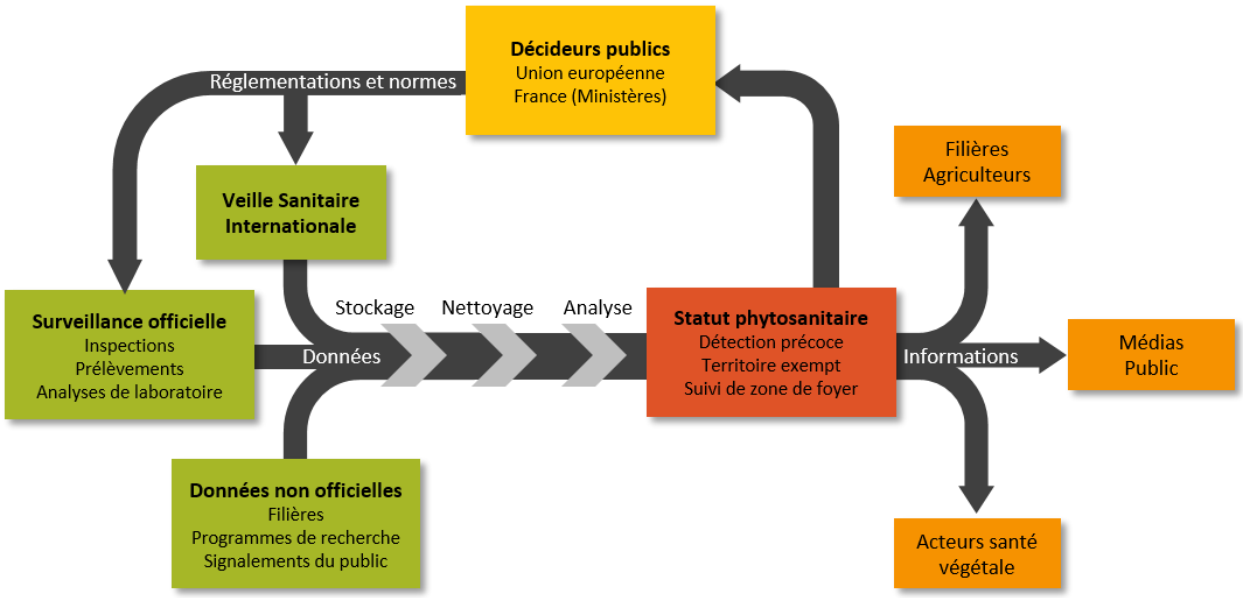


Figure 1 : Les étapes de la surveillance. La surveillance commence avec la définition des menaces à travers la veille sanitaire internationale et la classification des organismes nuisibles sur des listes officielles. Le cœur de la surveillance repose sur la collecte de données, principalement via la surveillance officielle, mais aussi et de plus en plus par des voies non officielles. Les données doivent être nettoyées, stockées et analysées pour aboutir à leur interprétation en termes de statut phytosanitaire. Ces informations sont ensuite communiquées aux pouvoirs publics, pour orienter les stratégies de lutte, et à différents publics. La plateforme ESV intervient à différents stades de ce processus (veille, gestion des données, communication).

2. Définir les menaces

2.1. La veille sanitaire internationale

Le premier rôle de la surveillance est d'anticiper les menaces imminentes, apprendre à connaître les organismes qui émergeront demain sur le territoire et établir des priorités. Cette vigilance se décline sous deux formes. La première est une veille générale non ciblée qui vise à détecter des signaux faibles d'émergences inattendues. La seconde, qui découle en partie de la première, se focalise sur des organismes nuisibles particuliers, identifiés sur des listes définies au niveau national et international (voir chapitre 16). Elle vise à préciser des scénarios possibles d'émergence, pour organiser une surveillance des points d'entrée probables, et à assembler un corpus de connaissances qui serviront à caler la surveillance et la lutte après émergence. On parle ici de connaissances sur la biologie de l'organisme, son habitat (hôtes et niche écologique), ses modes et capacités de dispersion, ses impacts, et sur les moyens de détection et de lutte connus.

Il existe différentes veilles actives en santé des plantes comme exemple la newsletter de l'EFSA[1] (Plant Health Newsletter[2]), les alertes de CABI[3] (Pest alerts[4]), les notifications de PestLens (APHIS-PestLens[5]), le service d'information de l'OEPP[6] (EPPO reporting[7]) ou encore les bulletins de veille de la Plateforme ESV (Encadré 1).

Pour acquérir ces connaissances, chaque veille ausculte de façon régulière la littérature scientifique (publiée dans des journaux à comité de lecture), les médias, qui mettent en lumière les derniers évènements, et parfois les signaux envoyés lorsque le grand public exprime sur internet des suspicions ou observations de symptômes. Ainsi, à la remontée d'informations identifiées par un réseau d'experts, s'ajoute une collecte d'informations partiellement automatisée via des outils d'extraction de contenu (« web scraping », par exemple MedISys) des journaux d'intérêt ou des flux RSS d'agrégateurs de publications scientifiques (tels que PubMed ou Google Scholar) ou de médias (comme Google News). Ces programmes utilisent des critères basés sur des listes de mots-clés ciblant les organismes nuisibles ou plus généralement la santé des plantes. Cette collecte automatique permet d'atteindre une certaine exhaustivité mais elle ramène aussi beaucoup d'articles non pertinents et doit donc être triée. Ce tri est souvent manuel – et donc chronophage et fastidieux – mais des outils de classification ou de hiérarchisation (basés sur l'apprentissage automatique, ou « machine learning », et sur la fouille de texte, ou « text mining ») sont de plus en plus sollicités. Idéalement, les articles identifiés sont stockés dans une base de données, et les acteurs de la veille diffusent les informations plus ou moins retravaillées via des bulletins ou un site web dédié.

2.2. La classification des organismes nuisibles

En France, la surveillance des végétaux est régie par le règlement européen ((UE)2016/2031) relatif aux mesures de protection contre les organismes nuisibles aux végétaux qui classe les Organismes nuisibles Réglementés ou Émergents (ORE) (voir chapitre 16). Par exemple, *Xf* est classée OQP (Organisme réglementé de Quarantaine Prioritaire) car présente en Europe et pouvant menacer de nombreuses cultures françaises. Le champignon *Bretziella fagacearum* est un OQ (Organisme réglementé de Quarantaine) car il est présent uniquement en Amérique et menace essentiellement

[1] European Food Safety Authority : https://www.efsa.europa.eu/fr
[2] https://www.efsa.europa.eu/fr/publications?f%5B0%5D=type%3A333
[3] Commonwealth Agricultural Bureaux International : https://www.cabi.org/
[4] https://www.plantwise.org/KnowledgeBank/pestalert/signup
[5] https://pestlens.info/
[6] Organisation Européenne et méditerranéenne pour la Protection des Plantes : https://www.eppo.int/
[7] https://www.eppo.int/RESOURCES/eppo_publications/eppo_reporting_service

les chênes en France. Chaque type d'organisme nuisible se voit associé un type de surveillance (annuelle ou pluriannuelle) et une zone concernée (tout le territoire, tout le territoire hors zone délimitée, zone protégée, environnement de production). Les états membres de l'UE (Union Européenne) doivent mettre en place des mesures complémentaires de surveillance et de lutte pour l'ensemble des organismes de quarantaine de l'UE afin de renforcer la surveillance. En France métropolitaine, cela se fait par arrêté ministériel ou préfectoral. Depuis le 14 décembre 2019, les territoires ultramarins français sont considérés comme pays tiers de l'Europe du point de vue des questions phytosanitaires et doivent disposer de listes d'ORE adaptées à chacun.

3. Définir une stratégie d'échantillonnage

Le plan de surveillance définit ce que l'on surveille (importations, compartiments naturels, parcelles agricoles), avec quel effort d'échantillonnage (combien d'échantillons par parcelle, combien de parcelles), à quelle fréquence. Les plans de surveillance sont amenés à évoluer régulièrement en fonction du risque et de l'état sanitaire du territoire. Ils répondent à plusieurs objectifs spécifiques. Le premier est d'anticiper l'arrivée de bioagresseurs non encore présents sur le territoire – on parle alors de vigilance. Cette étape est l'occasion d'accumuler des connaissances sur l'organisme. Le deuxième objectif est de s'assurer et assurer les autres pays que le territoire est exempt de ces organismes nuisibles. Le statut exempt a des conséquences sur la réglementation et les importations / exportations de matériel végétal. Le troisième objectif est la détection précoce des tous premiers foyers d'installation des populations émergentes, une condition nécessaire pour espérer éradiquer ces populations. Enfin en cas d'échec de ces stratégies d'anticipation, la surveillance s'attachera à suivre la propagation des populations émergentes afin d'accompagner la lutte. Selon l'organisme, et l'objectif, différentes stratégies d'échantillonnage pourront être mises en place et éventuellement combinées.

3.1. Stratégies d'échantillonnage classiques

En l'absence de foyer déjà détecté, on réalise communément une surveillance peu orientée, qui recouvre une large surface du territoire avec un réseau de capteurs physiques ou humains efficaces, selon des stratégies d'échantillonnage classiques en statistiques (échantillonnage systématique, aléatoire simple, stratifié ou en grappe). Pour optimiser le ratio bénéfice / coût de cette surveillance, l'utilisation d'un réseau de surveillance préexistant est une solution efficace. Par exemple, le Réseau National de Surveillance Aérobiologique, qui mesure les taux de pollens allergènes aux abords des

villes au moyen de pièges à spores, sera désormais également utilisé pour détecter précocement la présence d'agents pathogènes fongiques dans les airs. De même, concernant le nématode du pin, *Bursaphelenchus xylophilus*, OQP actuellement présent au Portugal et en Espagne, le caractère exempt du territoire français est ainsi confirmé chaque année depuis 2013 par une surveillance étroite des pins français réalisée par les correspondants observateurs du Département Santé des Forêts et par une surveillance des matériaux bois réalisée par les services décentralisés de la DGAL (Direction Générale de l'Alimentation). Tous les dépérissements suspects sont signalés et font l'objet d'analyses en laboratoire, ainsi que toutes les importations de matériaux bois issues des pays contaminés.

Il est possible de calibrer l'effort d'échantillonnage de façon à atteindre un certain objectif d'efficacité. Cela peut se faire *a priori* en utilisant des principes statistiques. Par exemple, pour le HLB à la Réunion, dans les communes considérées comme indemnes, le protocole d'échantillonnage établi par l'Anses[8] est calibré pour que la probabilité de ne pas détecter la maladie dans une zone où elle circulerait à faible fréquence soit inférieure à 5%. Il prévoit ainsi de prélever 60 agrumes par hectare, soit en moyenne 30 arbres par parcelle. On peut aussi optimiser un réseau *a posteriori* en utilisant les données passées et en simulant comment des allègements du réseau affectent ses performances. Cette démarche a par exemple permis de montrer qu'il était possible d'alléger le réseau de placettes de surveillance de la septoriose du blé en Champagne Ardennes (Michel 2016).

3.2. Stratégies d'échantillonnage basées sur le risque

Une autre approche est l'échantillonnage basé sur le risque. En l'absence de travaux de modélisation de niche basés sur la relation entre facteurs éco-climatiques et sociologiques (voir chapitre 3) et présence ou abondance de l'organisme nuisible, on peut néanmoins définir des critères de risques et des zones cibles à dire d'expert. L'EFSA et l'Anses par exemple réalisent des analyses de risque phytosanitaire (ARP) sur la base de la littérature scientifique existante pour conseiller et orienter les décideurs publics (Vos *et al.*, 2019).

[8] Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail

Par ailleurs, pour les organismes absents du territoire, on peut cibler les points stratégiques d'entrée (Dionisio, 2014) et éventuellement affiner en les croisant avec la présence d'hôtes sensibles ou de conditions écologiques favorables. La Plateforme ESV a ainsi produit un indicateur du risque d'entrée et d'établissement pour le nématode du pin en France. L'analyse a pris en compte des critères de risque d'entrée (importations de matériaux de conifères, zones de stockages de produits bois, comme des palettes, quantités de grumes de pins traitées par les scieries…) et d'établissement (surface d'hôtes sensibles, températures favorables, feux de forêt dont les fumées attirent le vecteur du nématode du pin), pondérés sur dires d'experts. Par une méthode de hiérarchisation, chaque unité épidémiologique (des données sont disponibles à l'échelle du département ou de quadrats de 8 km par 8 km, selon les régions) a été associée à une valeur de risque, visualisable sur des cartes interactives par les acteurs de terrain de la surveillance (Figure 2).

Pour des organismes suivis, on peut mobiliser très vite les premières données de surveillance. Pour le HLB à la Réunion, celles-ci ont montré une relation entre la contamination des vergers d'agrumes et

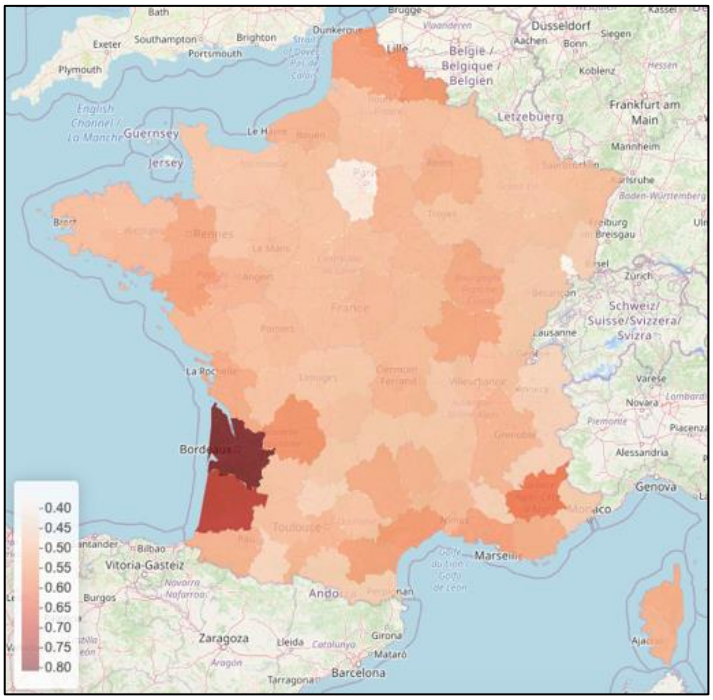


Figure 2 : Carte du risque d'introduction du nématode du pin en France. Source : Plateforme ESV, https://shiny.biosp.inrae.fr/app/PWN-shiny. Plus la couleur est sombre plus le risque d'introduction dans la région tend vers 1.

(i) l'altitude – *Diaphorina citri*, le psylle vecteur du HLB circule majoritairement en-dessous de 800 mètres – et (ii) la connectivité des vergers. Un verger est dit connecté s'il est entouré de grands vergers proches, susceptibles d'être des sources de maladie, et il est d'autant moins connecté que ses voisins sont petits et lointains. Depuis ce constat, le choix des parcelles à prélever se fait chaque année en priorisant les parcelles de plus forte connectivité sous les 1000m d'altitude.

Enfin, quand des données de surveillance sont disponibles et suffisamment nombreuses, des cartes de risque peuvent être établies à différentes échelles, permettant de mettre en application les méthodes d'inférence du risque développées par la recherche, comme dans le cas de *Xf* (Martinetti et Soubeyrand, 2018). Il reste à démontrer que ces méthodes sont appropriables par des dispositifs générant de moins importants jeux de données.

L'UE, au travers de l'EFSA, s'est récemment dotée d'un outil d'aide à la conception de plans d'échantillonnage afin que la surveillance atteigne partout certains standards. RIBESS (Risk Based Estimate of System Sensitivity) permet de définir un nombre d'inspections ou de prélèvements à réaliser par unité épidémiologique en se basant sur le risque. Il permet de prendre en compte le taux d'erreur attendu en intégrant la fiabilité des outils de détection des laboratoires. Appliqué dans le cadre de la vérification du statut exempt d'un territoire, RIBESS permet ainsi d'assurer les pays tiers qu'un taux d'erreur défini (par exemple 5%) est atteint par la surveillance mise en place.

3.3. Échantillonnage à partir de foyers

Lorsqu'un organisme a été détecté sur le territoire, sans pour autant abandonner la surveillance large, une priorité est de délimiter les zones infectées et les zones indemnes afin de déclencher des mesures de lutte ajustées à chaque situation. Pour ce faire, il est naturel d'échantillonner de manière renforcée de petites zones ciblées autour des foyers déjà détectés. Pour les OQP, le suivi de la propagation à partir de foyers est formalisé dans un Plan National d'Intervention Sanitaire d'Urgence (PNISU). Par exemple, pour *Xf*, le PNISU prévoit que la détection d'un foyer entraîne une obligation d'information à destination des professionnels et du public (articles 12 et 13 du règlement EU 2016/2031). La mise en place de mesures d'éradication et de restriction de mouvement de végétaux, et la délimitation d'une zone infestée et d'une zone tampon par arrêté préfectoral (articles 17 et 18 du règlement 2016/2031). Dans la zone infestée, tous les végétaux hôtes sont inspectés et prélevés qu'ils soient symptomatiques ou asymptomatiques. Dans la zone tampon, les plantes hôtes sont inspectées visuellement et prélevées si suspectes. Si un échantillonnage a lieu, il est basé sur un inventaire des végétaux hôtes, la cartographie du territoire (zone agricole, forêt, zone urbaine, autres zones) et une calibration par l'outil RIBESS. Au fur et à mesure que de nouveaux végétaux sont confirmés positifs, la zone délimitée est recalculée.

4. Mettre en place une organisation efficace

Une fois la stratégie de surveillance définie, tout l'enjeu réside dans sa correcte exécution au travers d'une organisation comprenant de nombreux acteurs, qui peuvent varier selon l'organisme et le milieu impacté (Figure 3).

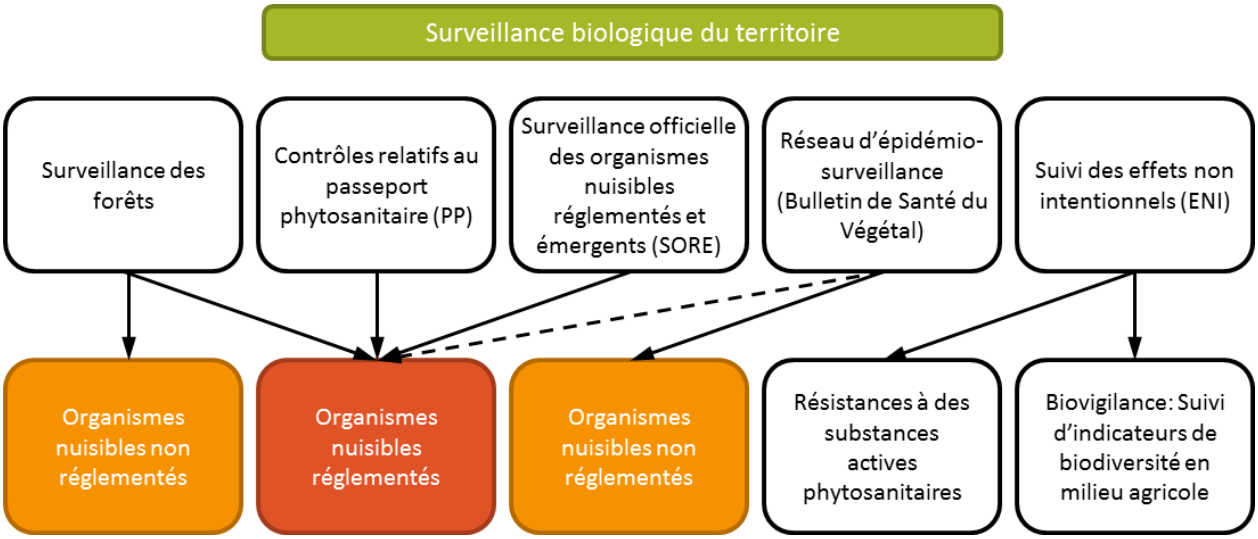


Figure 3 : Le périmètre de la Surveillance Biologique du Territoire en France. Source : Instruction technique DGAl/SDQSPV/2019-87627/12/2019. Le suivi des effets non intentionnels consiste à la surveillance d'espèces bio-indicatrices en milieu agricole. La flèche en pointillés traduit des observations faites sur des ORE par le réseau d'épidémio-surveillance, bien que cela ne soit pas sa fonction première.

4.1. Le territoire agricole hors forêt

Au sein du ministère de l'agriculture, la DGAL est en charge de la politique de santé des végétaux. Elle donne les instructions nationales aux SRAL (Service Régional de l'Alimentation) qui déclinent cette politique au niveau régional et mettent en œuvre la coordination des plans de surveillance en région. Ils décident, selon la situation de la région, des zones à prospecter, du nombre d'échantillons à réaliser et de leur fréquence. Les résultats obtenus sont également centralisés par les SRAL et remontent à la DGAL. Les SRAL mandatent des organismes délégataires pour réaliser les inspections et prélèvements, appelés Organismes à Vocation Sanitaire (OVS), principalement les FREDON (Fédération REgionale de

Défense contre les Organismes Nuisibles) mais également les CTIFL[9], GEVES[10], GNIS[11], FranceAgriMer... Le réseau des Laboratoires de la Santé des Végétaux (LSV) de l'Anses et des laboratoires départementaux agréés (LDA) réalisent les analyses des prélèvements suivant des méthodes officielles. Les laboratoires diffèrent par leurs spécialités scientifiques (nématologie, mycologie, bactériologie, virologie ...). Il existe cinq LSV et 17 LDA en métropole et un LSV et deux LDA dans les outremers. En sus de cette organisation cadre, les professionnels, coopératives, négoces, pépiniéristes, jardineries, collectivités locales, gestionnaires d'espaces et particuliers peuvent être acteurs de la surveillance en notifiant aux SRAL des observations ponctuelles. Il peut exister de petites variations entre territoires sur ces principes d'organisation, notamment dans les DROM. Par exemple à la Réunion, la DAAF[12], qui est le relais local de la DGAL, organise la surveillance, définit les plans, et délègue les inspections et les analyses de laboratoire à la FDGDON[13], qui fait office d'OVS et de LDA.

4.2. Les forêts

En France, historiquement, les forêts sont gérées séparément du reste du paysage agricole. Ainsi dans les années 90, le DSF a mis en place trois réseaux de surveillance couvrant l'ensemble des forêts françaises. Le réseau des correspondants observateurs (CO) s'appuie sur près de 220 forestiers volontaires formés à la surveillance d'organismes nuisibles cibles. Le réseau systématique de suivi des dommages forestiers (RSSDF) du DSF et le réseau national de suivi des écosystèmes forestiers (RENECOFOR) de l'ONF reposent sur un suivi de centaines de placettes permanentes. Ces réseaux permettent de combiner (i) une veille sanitaire non ciblée des dommages forestiers, (ii) une surveillance basée sur le risque et ciblée sur des organismes nuisibles encore absents du territoire à ce jour (par exemple, le nématode du pin, la fusariose des pins), et (iii) le suivi spécifique des principaux problèmes observés depuis 20 ans (processionnaire du pin, défoliateurs des chênes, scolytes des résineux…) en tenant compte de l'impact du changement climatique dans la rédaction des protocoles.

[9] Centre Technique Interprofessionnel des Fruits et Légumes
[10] Groupe d'Étude et de contrôle des Variétés Et des Semences
[11] Groupement National Interprofessionnel des Semences et des plants
12 Direction de l'Alimentation de l'Agriculture et de la Forêt
13 Fédération Départementale des Groupement de Défense contre les Organismes Nuisibles

4.3. Les frontières

La surveillance des frontières repose sur le Service d'inspection vétérinaire et phytosanitaire aux frontières (SIVEP), un service de la DGAL en charge des contrôles phytosanitaires à l'importation en provenance de pays extérieurs à l'UE. Ce service surveille, pour la santé végétale, les 38 points d'entrée communautaires (PEC)[14] de la France, dont par exemple, le port du Havre, le marché de Rungis ou les aéroports d'Orly ou de Saint-Denis (Réunion). Les contrôles à l'importation réalisés dans les PEC portent sur (i) les documents associés aux lots importés (conformité, certificats et passeports phytosanitaires (Figure3)), (ii) l'identité du lot à inspecter (correspondance de la denrée végétale et de la quantité déclarée) et (iii) la réalisation d'inspections visuelles et de prélèvements en cas de suspicion de la présence d'organismes nuisibles. Les lots non conformes subissent différentes mesures adaptées selon le cas (traitement phytosanitaire, mise en quarantaine, réexpédition ou destruction).

4.4. Articulation des stratégies d'échantillonnage

À l'échelle d'un territoire, différentes stratégies de surveillance peuvent intervenir en parallèle pour un même organisme. Par exemple, la surveillance des foyers de *Xf* s'ajoute à d'autres stratégies de surveillance : (i) la surveillance programmée officielle dans le cadre de la délivrance du Passeport Phytosanitaire Européen, et de la surveillance officielle des organismes réglementés ou émergents (SORE) (Figure3) pour chaque filière concernée (Arboriculture, Cultures ornementales ; Jardins, Espaces Verts et Infrastructures ; Vigne), (ii) une surveillance programmée non officielle via le réseau d'épidémiosurveillance Ecophyto et le Département de la Santé des Forêts (DSF), (iii) une surveillance événementielle des dépérissements anormaux. Les analyses de risque permettent de cibler des lieux de surveillance prioritaire (points d'entrée communautaires, pépiniéristes, marchés d'intérêt national, circuit de distribution, lieux de production, zones non agricoles …) ainsi que les plantes à surveiller selon les différentes modalités de surveillance.

[14] https://agriculture.gouv.fr/importation-de-produits-animaux-danimaux-vivants-daliments-pour-animaux-et-de-vegetaux

5. Gérer et exploiter les données

5.1. Le devenir des données

Les données issues des inspections et des laboratoires agréés sont enregistrées dans des bases de données officielles comme Resytal, dispositif partagé par l'ensemble des personnels de la DGAL. Il existe un enjeu important autour de la rapidité de traitement des données. Il a en effet été clairement montré, notamment pour le HLB, que la durée entre le prélèvement et la notification aux agriculteurs est un facteur clé de la réussite des stratégies d'éradication précoce (Cunniffe et al. 2015). Un verrou important à l'exploitation rapide des données est la nécessité de les « nettoyer », c'est-à-dire de procéder à une vérification systématique des erreurs et une standardisation des formats. Actuellement, en France, la centralisation des données dans un but d'analyse et d'interprétation n'est pas encore optimale, et la Plateforme ESV d'une part, et des programmes de recherche associés d'autre part, sont actuellement à pied d'œuvre pour inventer et mettre en place les systèmes d'information qui permettront demain de fluidifier le flux de données des acteurs de la surveillance vers les agriculteurs.

5.2. La surveillance comme étape de la lutte

Le premier apport de la surveillance est de fournir des informations permettant d'empêcher l'installation des bioagresseurs émergents sur le territoire par leur éradication. La tâche est complexe, particulièrement dans des territoires très connectés à leurs voisins comme la France métropolitaine. On trouve les meilleurs exemples d'éradication précoce (et même tardive) en Australie. Depuis 1912, l'Australie détecte régulièrement des foyers de *Xanthomonas citri* pv. *citri*, bactérie responsable du chancre bactérien des agrumes. A chaque détection sur son territoire, le pays a mis en place d'importants programmes d'éradication. Celui de 2005-2009 consistait à arracher toutes les plantes hôtes de la zone de lutte (50 km de rayon), détruire tous les agrumes sauvages de la zone tampon, et intensifier la surveillance des agrumes cultivés et sauvages sur tout le territoire. Cette campagne d'éradication a été estimée à 17,6 millions de dollars et 200 000 h de travail (Gambley et al. 2009). Au regard de ce coût, on conçoit l'importance d'une surveillance efficace et coordonnée à l'échelle de plusieurs pays (voir chapitre 19).

5.3. L'amélioration continue de la surveillance

Les dispositifs de surveillance sont toujours initialement conçus avec une certaine incertitude quant à leur efficacité. Mais les données collectées permettent au fil du temps de réévaluer la pertinence du plan de surveillance et de l'améliorer. Par exemple, la Plateforme ESV a aidé le DSF à optimiser le réseau de surveillance de la processionnaire du pin (*Thaumetopoea pityocampa*), un papillon ravageur dont les chenilles sont allergisantes. Ce réseau, actif depuis 1989, a beaucoup évolué et comporte actuellement 514 placettes, caractérisées par leur localisation et leur environnement (altitude, type de forêt, type de sol ...), le nombre de pins observés, le nombre de pins infectés et le nombre de nids de processionnaires. L'analyse de ces données, par classification hiérarchique, a permis de mettre en évidence des placettes redondantes en termes de dynamique de population. Ces résultats ont été transférés au DSF sous la forme d'un outil interactif permettant à chaque grande région écologique de supprimer une à plusieurs placettes redondantes du réseau sans perdre en qualité.

Comme on l'a vu, les systèmes de surveillance sont des réseaux complexes d'acteurs appartenant à des organismes différents et donc avec des missions et des cultures différentes. Au-delà du travail de recherche amont sur l'amélioration des méthodes de diagnostic ou d'échantillonnage, l'optimisation des systèmes de surveillance passe en grande partie par l'amélioration de la coordination entre acteurs (communication, échange et valorisation de données (Michel, 2016)). Initialement mise au point pour l'évaluation des systèmes de surveillance en santé animale, la méthode OASIS (Outil d'analyse de systèmes d'information en santé, Hendrikx *et al*., 2011) commence à être utilisée en France pour les végétaux avec actuellement deux évaluations en cours sur *Xf* et le HLB. OASIS permet une évaluation semi-quantitative de près de 70 critères réalisée suite à des entretiens avec les acteurs de la surveillance par un comité d'évaluation. Ces critères couvrent différents aspects de la surveillance comme l'organisation institutionnelle, la gestion des données, la communication ou encore la bonne formation des acteurs.

5.4. Sensibilisation et information

Une des sorties importantes de la surveillance est l'information des acteurs du monde agricole, au premier rang desquels les agriculteurs. Cette communication sur l'état sanitaire de notre territoire peut se faire par des retours directs (réunions d'information, formations) ou par l'intermédiaire de multiples supports (bilan sanitaire annuel, bulletin de la santé du végétal hebdomadaire (Figure 3), bulletin de veille scientifique et sanitaire internationale, fiche de reconnaissance des organismes, site

web de la Plateforme ESV…) qui peuvent être utilisés pour visualiser et faire parler les données de la surveillance[15].

La sensibilisation du grand public est également importante pour la remontée d'alertes et la prévention de comportements contribuant à la propagation épidémique. Des campagnes de communication peuvent être mises en place par la DGAL. C'est le cas pour *Xf*, avec des affiches (Figure 4), des brèves dans les médias et des messages à la radio et la télévision.



Figure 4 : Sensibilisation du public. Exemples d'affiches conçues par la DGAL sur les risques associés au transport de végétaux en lien avec *Xylella fastidiosa* (à gauche) et par la DAAF Réunion en lien avec la mouche orientale des fruits *Bactrocera dorsalis* (à droite).

[15] Application Shiny sur la surveillance du Nématode du pin :https://shiny.biosp.inrae.fr/app/PWN-shiny

6. Conclusion

La surveillance est une étape clé d'une lutte contre les bioagresseurs des plantes cultivées respectueuse de l'environnement et de la santé humaine. Son optimisation relève d'un double défi, scientifique sur les méthodes de diagnostic et d'échantillonnage, et organisationnel parce que la surveillance est une chaîne aux contours variables. Selon les questions sanitaires, de multiples acteurs et institutions avec des missions et des cultures différentes interviennent. En France, la Plateforme ESV est un lieu privilégié permettant la convergence d'acteurs de la recherche, de la surveillance et de la gestion. Pour aller plus loin, il est probable que les acteurs de la santé des végétaux devront à terme progresser sur la participation des agriculteurs et du public. En écologie et en santé humaine, le public, plus ou moins éclairé, participe de façon massive à la remontée d'informations pour les scientifiques et les acteurs de la surveillance. Cette culture participative peine à se mettre en place dans le monde agricole et il sera intéressant dans le futur de travailler sur les freins qui empêchent encore la mise en place de ce type d'échanges entre les professionnels et les acteurs de la surveillance.

7. Références

Aubert, B., 1988. Le greening, une maladie infectieuse des agrumes, d'origine bactérienne, transmise par des homoptères psyllidés : contribution à l'étude d'une stratégie de lutte appliquée au cas de l'île de la Réunion (thesis). CIRAD-IRFA, s.l.

Cunniffe, N.J., Cobb, R.C., Meentemeyer, R.K., Rizzo, D.M., Gilligan, C.A., 2016. Modeling when, where, and how to manage a forest epidemic, motivated by sudden oak death in California. PNAS 113, 5640–5645. https://doi.org/10.1073/pnas.1602153113

Cunniffe, N.J., Stutt, R.O.J.H., DeSimone, R.E., Gottwald, T.R., Gilligan, C.A., 2015. Optimising and Communicating Options for the Control of Invasive Plant Disease When There Is Epidemiological Uncertainty. PLOS Computational Biology 11, e1004211. https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1004211

Dionisio, C., 2014. Mise en place d'une stratégie relative aux espèces exotiques envahissantes en Nouvelle-Calédonie, ETAT DES LIEUX BIBLIOGRAPHIQUE. ADECAL Technopole. Disponible sur le site en date du 7 mai 2021. https://especes-envahissantes-outremer.fr/wp-content/uploads/2017/03/synthese_bibliographique_eee_nouvelle_-caledonie_2014.pdf.

Gambley, C.F., Miles, A.K., Ramsden, M., Doogan, V., Thomas, J.E., Parmenter, K., Whittle, P.J.L., 2009. The distribution and spread of citrus canker in Emerald, Australia. Australasian Plant Pathology 38, 547–557. https://doi.org/10.1071/AP09043

Hendrikx, P., Gay, E., Chazel, M., Moutou, F., Danan, C., Richomme, C., Boue, F., Souillard, R., Gauchard, F., Dufour, B., 2011. OASIS: an assessment tool of epidemiological surveillance systems in animal health and food safety. Epidemiology & Infection 139, 1486–1496. https://doi.org/10.1017/S0950268811000161

Last, J.M., International Epidemiological Association (Eds.), 2001. A dictionary of epidemiology, 4th ed. ed. Oxford University Press, New York.

Magarey, R.D., Colunga-Garcia, M., Fieselmann, D.A., 2009. Plant Biosecurity in the United states: Roles, Responsibilities, and Information Needs. BioScience 59, 875–884. https://doi.org/10.1525/bio.2009.59.10.9

Martinetti, D., Soubeyrand, S., 2018. Identifying Lookouts for Epidemio-Surveillance: Application to the Emergence of Xylella fastidiosa in France. Phytopathology 109, 265–276. https://doi.org/10.1094/PHYTO-07-18-0237-FI

Michel, L., 2016. “Mieux valoriser les réseaux d’épidémiosurveillance lors de l’élaboration du Bulletin de Santé du Végétal”. Mémoire de thèse. 188p.

Parnell, S., Gottwald, T.R., Riley, T., Bosch, F. van den, 2014. A generic risk-based surveying method for invading plant pathogens. Ecological Applications 24, 779–790. https://doi.org/10.1890/13-0704.1

Vos, S., Camilleri, M., Diakaki, M., Lázaro, E., Parnell, S., Schenk, M., Schrader, G., Vicent, A., 2019. Pest survey card on Xylella fastidiosa. EFSA Supporting Publications 16, 1667E. https://doi.org/10.2903/sp.efsa.2019.EN-1667

8. Glossaire

Réservoir : Milieu d'accueil pour la maladie ou les vecteurs autre que l'hôte principal.

Risque : Probabilité de présence d'un agent pathogène ou d'une maladie à un endroit donné.

Carte de risque : Projection du risque sur territoire.

Vigilance : mesures d'anticipation de l'arrivée de bioagresseurs sur un territoire.

Eradiquer : Faire disparaitre un organisme/ une maladie d'un territoire.

Passeport Phytosanitaire Européen : Le passeport phytosanitaire européen (PP) est un document officiel attestant du respect des dispositions réglementaires européennes relatives aux organismes de quarantaine (normes phytosanitaires, exigences particulières) qui accompagne certains végétaux, produits végétaux ou autres objets circulant sur le territoire de l'Union Européenne (définition Draaf Centre-Val de Loire)

Passeport phytosanitaire : idem, autre territoire.

Unité épidémiologique : entité à laquelle on attribue un statut sanitaire.

Réseau d'épidémiosurveillance : ensemble des acteurs et structures chargés de réaliser la surveillance d'un agent pathogène.

Avant-propos 2

A l'initiation du projet thèse, il y a eu le constat que la connaissance du parcellaire agrumicole détenue par la DAAF était trop lacunaire pour assurer la surveillance et mener des travaux de recherche sur l'optimisation de cette surveillance. Il était admis que seulement une partie du parcellaire était connue et celui-ci méritait un travail de rafraichissement sur la couche d'information géographique notamment avec le contour des parcelles d'agrumes. Or rapidement les acteurs de la surveillance ont eu besoin de savoir précisément où échantillonner la maladie et surtout d'identifier des parcelles non répertoriées pour la recherche de zones indemnes, qui était l'un des objectifs du dispositif de surveillance. Les travaux déployés dans le chapitre 2A de photo-interprétation ont été menés en parallèle de la surveillance, fournissant dès le début de la thèse des mises à jour du parcellaire aux acteurs du dispositif. Lorsque l'importance de surveiller les parcelles les plus connectées a été intégrée à la surveillance, nous avons également fourni la localisation de ces parcelles les plus connectées.

Bien que la vérification sur le terrain de la culture présente dans un verger et l'amélioration de la connaissance du parcellaire en général demandent un investissement en temps non négligeable (plusieurs stages ont d'ailleurs eu lieu dans ce cadre), l'aspect restreint de la surface totale est un facteur encourageant. Il est possible d'effectuer la photo-interprétation de l'ensemble du territoire réunionnais et de réduire grandement les zones ciblées par la surveillance.

Cette première partie de chapitre, sous la forme d'un article, a été soumis à PhytoFrontiers le 18/03/22.

Le chapitre 2B a été conduit à partir des décisions et interrogations issues des Comité de pilotage de la surveillance. Par exemple, en 2017, le dispositif de surveillance voyait la variable altitude comme générant un gradient de la présence de la maladie, reflétant des observations issues lors de la première épidémie de HLB (Aubert) et des intuitions basées sur la répartition des détections. Nos travaux ont permis de mettre en évidence qu'il s'agissait plutôt d'une limite au-delà de laquelle la maladie ne circule plus et plus haute que celle estimée initialement. En 2018, le dispositif s'est intéressé à savoir s'il existait des zones indemnes à la Réunion. Pour cela, les calculs de connectivité et la recherche d'une structure géographique du parcellaire en bassins de production a servi ce but. Les travaux de recherche menés dans ce chapitre ont aussi mis la lumière sur l'importance non seulement des parcelles connectées mais aussi des parcelles plus isolées mais assurant le lien de poches de connectivité. C'est le cas par exemple dans les régions de Saint-Leu et Etang-salé connectant le sud à l'ouest de l'île.

CHAPITRE 2A: Améliorer la connaissance du paysage agrumicole à la Réunion

Improved knowledge on cultivated citrus landscape in Reunion island: Consequences for the surveillance of Huanglongbing.

Ismaël Houillon[1, 2, 3, 4], Marine Weishaar[1], Camille Guilloteau[1], Rhianna McAneny[1], Nathan Crequy[1], Corentin Exbrayat[1], Anna Doizy[5], Olivier Pruvost[1], Anne Quillévéré-Hamard[3], Pauline de Jerphanion[3], Aude Chabirand[4], Samuel Soubeyrand[2], Virginie Ravigné[6,7*]

[1] CIRAD, UMR PVBMT, 97410, Saint Pierre, La Réunion.

[2] BioSP, INRAE, 84914, Avignon, France.

[3] Unité Epidémiologie et Appui à la Surveillance, Laboratoire de Lyon, ANSES, 69007 Lyon, France.

[4] Unité des Ravageurs et agents pathogènes tropicaux, Laboratoire de la santé des végétaux, ANSES, 97410, Saint Pierre, La Réunion.

[5] DoAna - Statistiques Réunion, F-97480, La Réunion, Saint Joseph, France.

[6] CIRAD, UMR PHIM, F-34398 Montpellier, France.

[7] PHIM, Univ Montpellier, CIRAD, INRAE, Institut Agro, IRD, Montpellier, France.

[*] Corresponding author: Virginie Ravigné; E-mail: virginie.ravigne@cirad.fr

Keywords: Epidemiology, surveillance systems, remote sensing, machine learning, citrus

Funding: ANR-17-CE32-011 and ERDF contract GURDT I2016-1731-0006632.

ABSTRACT

Plant diseases increasingly threaten food security in a context of globalization of trade and climate change. Understanding the mechanisms that drive epidemics in agricultural landscapes is therefore a key scientific objective, which critically depends on the production of good quality disease spread surveillance data. One prerequisite of the organization of surveillance is sampling, which requires a knowledge of host plant distribution in the agricultural landscape. However, in some developing countries or for crops of secondary economic importance, knowledge of land use can be partial and insufficient to understand landscape scale processes such as plant epidemics. In this study, we illustrate the importance of landscape knowledge using cultivated citrus in Reunion Island, threatened since 2015 by HuanglongBing (HLB), an insect-borne bacterial disease. First, we provide an improved georeferenced database of citrus orchards obtained after systematic photo-interpretation of aerial images, combined with field validation. We further explore the possibility of predicting whether candidate orchards are citrus or other trees by learning algorithms to replace field validation. Then, we question whether using the improved database of citrus orchards may alter the understanding of citrus epidemics and thereby impact disease surveillance strategies. To do so, we simulate disease spread in the initial official citrus orchard database and the improved one, using parameters compatible with HLB biology. We show that both the dynamics and final level of contamination drastically differ between the two databases. We discuss the implications of these findings for surveillance strategies and plead for increased investments into agricultural landscapes monitoring.

Keywords: Epidemiology, surveillance systems, remote sensing, machine learning, citrus.

INTRODUCTION

Effective management requires detecting epidemics at an early stage and anticipating their propagation in the agricultural landscape (Parnell et al., 2017). Designing efficient surveillance strategies of crop diseases represents a massive challenge where the need for frequent and representative sampling of large heterogeneous areas of landscape trades off with limited financial and logistical resources (Cunniffe et al., 2015). Risk-based surveillance, i.e., giving higher priority to plots with higher risks of contamination, has emerged as an appropriate framework to optimize surveillance (Parnell et al., 2014). It has been successfully applied to design surveillance and management strategies of several crop diseases, as *e.g.*, the quick decline syndrome caused by the bacterium *Xyllela fastidiosa* in France (Martinetti and Soubeyrand, 2018). These studies generally rely on abundant spatial data of pathogen presence and on a good ecological description of the landscape, *i.e*., topology, soil, climate, host and/or enemy distributions. Theoretical studies have shown that spatial uncertainties about host distributions can lead to biases in estimates and predictions of pathogen dynamics (Cunniffe et al., 2015). Knowledge of agricultural landscapes is therefore an essential foundation of the design of efficient surveillance strategies for crop diseases.

Accessibility to climate data has recently much improved (see WorldClim or CHELSA projects, Fick and Hijmans, 2017; Karger et al., 2020). Access to landscape data, including host spatial distribution, is often not a limiting factor, in surveillance systems with sufficient resources. Using transects, quadrats, sampling point method or interpretation of land cover from satellite images, official data provide a sufficient supply of information (*e.g.*, Abbate and Antonovics, 2014). However, there remain situations where access to spatial host distribution is challenging. For instance, *X. fastidiosa* has a very broad host spectrum, including wild and

ornamental plants (Costa et al., 2004). Knowledge of spatial host distributions may then only be inferred through abundant occurrence data (Martinetti and Soubeyrand, 2018). Insufficient knowledge of host distribution is expected frequent in poorly administered territories and for crops of secondary economic importance, for which plots may not be registered in any official database. The question may then arise whether improving knowledge of the landscape in these situations of lack of landscape data can improve disease monitoring and management.

Here we were interested in citrus cultivation in Reunion, a French island in South West Indian Ocean currently undergoing a reemergence of Huanglongbing (hereafter HLB) or citrus greening. This disease is locally caused by the uncultivable bacterial species *Candidatus* Liberibacter asiaticus (Garnier and Bové, 1996). Infected trees generally go through a long asymptomatic stage (several months to years). When they eventually appear, symptoms are not very specific and can easily be confused with water and nutrient deficiencies, or other diseases such as Tristeza. These characteristics prevent simple identification of tree health status in the field and make molecular tests mandatory, leading to a significant cost for monitoring.

This cost combines with a logistical challenge imposed by the very fragmented nature of citrus cultivation landscape in Reunion. Contrary to industrial production areas such as Florida, Reunion citrus is mainly targeted for local consumption and transformation. Hundreds of orchards of small size (less than 1 hectare) are distributed all around the island from sea level to elevations higher than 1000 meters for a total surface estimated at about 300 ha (Chaulet Gil, 2014). As this disease is specific to Rutaceae (Batool et al., 2007), knowing the location of citrus orchards could be an essential element of epidemiological surveillance and management, enabling to target human and financial resource where it will be most efficient

(Parnell et al., 2010). Such information is however very incomplete. This scarcity of official data, is likely related to the weak organization of the sector, the non-central place of citrus growing in many if not most farms (Dupré et al., 2017), and the absence of recurrent subsidies imposing farmer declaration. Altogether, these characteristics make this landscape an ideal model to study whether improving knowledge can make a difference for landscape surveillance and management.

Acquiring knowledge on crop spatial distribution is not trivial (You and Wood, 2005). In Reunion, attempts to infer land use using remote sensing have been conducted by analyzing multiple satellite images with segmentation and classification algorithms (Dupuy et al., 2020). But the approach proved unable to discriminate citrus orchards from other trees with sufficient precision (51% accuracy in the recognition of citrus orchards).

To overcome this difficulty and still improve knowledge of the spatial distribution of cultivated citrus in Reunion, we first verified and completed the official georeferenced database of Reunion citrus orchards using systematic photo-interpretation of satellite images and intensive field validation. As this approach is limited by the orchard accessibility and the human cost of visits, we attempted to complete it with a statistical modeling of the presence of citrus orchards using two complementary machine learning algorithms. We thereby produced several predicted versions of the citrus landscape. We compares the structure of the obtained cultivated citrus landscapes to the initial official database using various metrics (orchard area, perimeter-to-area ratio, and potential connectivity). We then illustrated the potential importance of landscape knowledge on our understanding of epidemic spread, by simulating epidemics with similar parameters in both the initial official citrus landscape and in the improved one.

MATERIALS AND METHODS

Official citrus database

The initial knowledge of citrus orchard distribution was contained in an official database, hereafter called P0, provided by French phytosanitary services (DAAF - Direction de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Forêt). P0 originates from the farmers declaring their activity to receive European Common Agricultural Policy aid. It contained 22,134 agricultural plots identified in 2016, among which 156 citrus orchards, in the form of a vector GIS layer containing polygons (Fig. 1).

Improved citrus landscape databases

As a first step to improve cultivated citrus knowledge, we first gathered all unofficial information available on citrus orchard location from a variety of stakeholders (farmer counselors, surveillance agents, and researchers), merging this information with official records and cleaning the resulting database (eliminating duplicates and re-drawing plot contours). All database manipulations were conducted with QGIS 3.10®. This resulted in a second GIS layer, named P1, with only citrus orchards recently certified as such by one of the citrus stakeholders.

As a second step, we proceeded to a systematic photointerpretation of Reunion agricultural landscapes, followed by field verification. Photointerpretation relied on the satellite photographs of Google satellite and Pléiades 2017-2020. Photointerpretation enabled identifying orchards, through the very distinct alignment of trees. However, as for remote sensing, it was impossible to distinguish citrus from other trees (typically mango and

lychee trees). Photointerpreted candidate orchards were therefore visited to establish the cultivated species, and when possible, the variety. In total, 1805 orchards have been visited, resulting in GIS layer P2.

Predicting citrus orchard distribution using machine learning

As a third step, we attempted to use known citrus orchard locations to predict the species cultivated in orchards not yet visited. This work was based on the assumption that choosing citrus cultivation is partly determined by soil and climatic conditions, partly based on farmers' sociological context (agronomic knowledge, incentives from local authorities…, Dupré et al., 2017). Here for each orchard in P2 (all citrus, mixed and non-citrus orchards), GPS coordinates of the centroid were used to retrieve ecological and climatic characteristics from GIS information available on AWARE (A Web Atlas for Agriculture, https://aware.cirad.fr): elevation, slope, three pluviometry descriptors (minimal rainfall in the 20% most humid years, minimal rainfall in the 20% driest years, and median annual rainfall between 1986 and 2016) and three temperature variables (minimal, mean and maximal annual temperature over the 1987-2017 period), soil composition, wind exposure and runoff. Sociological determinants were captured through densities of citrus orchards, constructions, forests and other crops in the area surrounding each orchard for radiuses ranging from 50 meters to 2000 meters. Predictive statistical modeling was carried out, using R (R Core Team, 2018), with the following learning algorithms: Support Vector Machine (SVM), implemented in the R package e1071 v 1.7-4 (Meyer et al., 2020), and Random Forests (RF) using the R package randomForest v4.6-14 (Breiman, 2001). SVMs are binary classification algorithms by supervised learning. They have the advantage of limiting the risks of over-interpreting the model, *i.e.,* classifying on parameters that are not sufficiently informative, by estimating complexity during the learning

phase. A SVM looks for a classifier or hyperplane that separates the data by maximizing the distance between the two classes of points. A non-linear transformation of the data by different kernels can be used. Here a radial kernel was used. Random Forest models perform learning on multiple randomly constructed decision trees trained on different subsets of the data set. For both methods, as a first step, 75% of the data were used to train the model, and the remaining 25% were used for validation (the selection of training and validation data was made in a random uniform way). Subsequently, a 10-repeat cross-validation was performed on the training set. Afterwards, the validated classifiers were used to predict the status of 1630 plots of unknown composition. The orchard layers obtained by these predictions are hereafter identified as P3 and P4 (for SVM and RF, respectively). Last, in order to test whether such approach could have been possible starting from the initial database P0, we applied the same methods on P0 instead of P2 as training data, using P1, with 2297 unverified orchards, as plots requiring prediction.

Prediction efficiencies were compared on the 10 cross-validation runs, using mean accuracy (the proportion of outcomes correctly predicted), mean sensitivity (the rate of true positives) and mean specificity (the rate of true negatives), as obtained with the R package caret (Kuhn, 2008).

Comparison of citrus databases

To compare citrus orchard databases, we computed the private and shared citrus areas for several pairs of databases. We also compared landscape structure among databases based on distributions of orchard area, perimeter-to-area ratio and potential connectivity.

Potential connectivity is an indicator of a network structure, that, in an epidemiological context, relates to the capacity to receive and transmit the disease (Hanski, 1998;

Meetnemeyer et al., 2012). The more a plot has a significant surface and is close to its neighbors, the more it will be a key point of the epidemiological paths by its capacity to emit and receive the disease. Potential connectivity can be written:

$$PC_i = \frac{\sum_j a_i a_j p_{ij}}{A_T^2} \quad (1)$$

where a_i and a_j are the areas of plots *i* and *j,* A_T is the total area under consideration, and p_{ij} are weights derived from a dispersal kernel. There is little data on HLB dispersal, but previous epidemiological studies have proposed an exponential dispersal kernel corresponding to the following weights:

$$p_{ij} = \theta e^{-\theta d_{ij}} \quad (2)$$

where d_{ij} is the distance between plots i and j, and θ is the dispersal parameter (Parry et al., 2014; Cunniffe et al. 2015). The exponential part of the kernel accounts for the fact that the probability of contamination is much higher at short distances and decreases non-proportionally with increasing distances. For HLB, θ was estimated at 0.1 m^{-1} for an outbreak propagating in gardens in Florida (Parry et al., 2014), equivalent to an average dispersion distance of 10 meters. Since the objective is to compare alternative landscape structures in a common area (Reunion), A_T was arbitrarily set to one.

Comparisons of metrics among databases relied on non-parametric Kruskall-Wallis tests for independent samples. When relevant, pairwise comparisons of means were conducted using Mann-Whitney tests.

Epidemiological simulations

To test whether improving knowledge on Reunion cultivated citrus landscape may modify our understanding of HLB epidemics, we simulated disease propagation in the initial (P0) and improved (P2) databases. Simulations were coded in R and based on a classical SEIR model, i.e., a compartmental model accounting for transitions of citrus trees between healthy (S), infected but not infectious (E), infectious (I), and removed (R) stages. The epidemiological unit was the orchard. Each time step (day), whether contamination of a healthy orchard *j* by an infectious orchard i occurred was drawn in a Bernoulli distribution of parameter $C_{ij}(t)$. The probability of a new contamination $C_{ij}(t)$ depended on the area of the healthy orchard a_j, the proportion of contaminated area in the infectious orchard $\alpha_i(t)$, and the dispersal kernel of the disease p_{ij} (equation 2):

$$C_{ij}(t) = 1 - exp\left(-K \times \frac{\sqrt{a_j}}{d_{ij}} \times p_{ij} \times \alpha_i(t)\right) \quad (3)$$

where K was a constant related to the transmissibility of the disease, hence the number of psyllid vectors in circulation. For the sake of simplicity, *K* was fixed at 1. Intra-orchard contamination $\alpha_i(t)$ was defined as using a threshold function as in Soubeyrand et al. (2009):

$$\alpha_i(t) = a_i \times \min\{1,\ \alpha_0 \times e^{rt_{inf}}\} \qquad (4)$$

where α_0 was the proportion of orchard area initially infected, t_{inf} the time spent in the infectious status and *r* was the growth rate of the intra-orchard infection.

Most model parameters were calibrated to be compatible with the biology of HLB as described in the literature (Supplemental Table S1). The latency period before an infected orchard becomes infectious was set to 15 days (Bové, 2006). The number of 5 trees initially contaminated in an orchard was fixed to 5 per hectare, and orchards were assumed to have a density of 600 trees per hectare. The growth rate of the intra-orchard infection was fixed so that an average orchard of 0.5 ha would be completely infected within the time frame of simulations (in two years). Based on the biology of the currently active HLB vector, *D. citri*, contamination was assumed impossible above a threshold elevation, and beyond a threshold dispersal distance (Aubert, 1988). Moreover, the highest contaminated orchard in Reunion has an elevation of 745 meters and official HLB surveillance data allowed estimating an elevation threshold of 881 m above which no contamination has ever occurred in Reunion (Supplemental Fig. S1). Because dispersal range and limits are poorly known, two threshold values were tested: three and six kilometers. In addition, to reduce simulation times, the average distance of disease dispersal between an infected and a healthy plot was set at 2 km, i.e., a θ of 0.0005. For both the initial (P0) and improved (P2) databases, we tested the two thresholds for dispersal distance (3 and 6 km) and two locations for the first infected orchard (Le Tampon or Petite Ile). For each of these eight parameter combinations, ten replicate simulations were run.

RESULTS

Data compilation, photointerpretation and field validation

The initial database P0 comprised 156 citrus orchards for a total area of 79.4 ha (white dots in Fig. 1A and white polygons in Fig. 1B). After compilation of official and unofficial databases, database P1 contained 428 citrus orchards (174.3 % more), for a total area of 179.2 ha (125.7% more, Fig. 2). A small proportion of P0 citrus area was not shared with P1 (about 6 ha). This loss is mainly due to our improving the precision of plot contours and separating multi-parcel polygons into individual orchards. Only two P0 orchards truly disappeared from P1, likely as a result of culling.

Photointerpretation and field verification resulted in database P2. Only 8% of the 1805 visited orchards could not be accessed due to geographic isolation or owner's absence. Database P2 thus contained 728 citrus orchards, among which 39 mixed orchards with citrus in combination with another crop, for a total area of 296 ha (orange dots in Fig. 1A and orange polgyons in Fig. 1C). This represents an increase of almost 250 ha of citrus relative to database P0. P2 also contained 905 non-citrus plots, and 1408 plots identified as containing planted trees still to be visited. In comparison of P1, P2 had 254 new citrus orchards (116 ha, Fig. 2), justifying the efforts invested in field work.

Predicting citrus orchard distribution using machine learning

Applied onto P2 database, SVM and RF learning algorithms produced orchard databases P3 and P4, respectively. Databases P3 and P4 shared 264 ha of citrus with database P2 (Fig. 2). As compared to P2, learning algorithms predicted 214 and 235 additional citrus

orchards among non-visited candidate orchards, i.e., 94 and 114 ha of citrus, yet to be validated *in situ* (Fig. 2). Applied onto the initial database P0, SVM and RF learning algorithms produced databases P5 and P6, respectively. Only small areas were shared (respectively 69 and 68 ha out of 420 ha, Fig. 2) between these predicted databases and P2, suggesting that P0 did not contain enough information to estimate the entire cultivated citrus landscape.

Predictions were associated with rather poor accuracies (~75%). For both learning databases (P0 and P2), predictions were slightly more accurate with RF than with SVM (Tab. 1). Mean sensitivities were better than specificities in all cases, indicating a greater difficulty for the algorithms to predict true negatives than true positives. The algorithms were more effective at predicting the nature of the orchards from database P2 than from database P0. Even in the best case (RF starting from P2, i.e., database P4), 10 % of the citrus orchards checked in the field were not recognized by the learning algorithms.

Comparison of citrus databases

All databases had similar distributions of orchard sizes and shapes (as estimated through perimeter-to-area ratios). In all databases, orchard areas had right-skewed leptokurtic distributions, with many small orchards and a few large ones. In databases P1 to P6 (resp. P0), 92% (resp. 87 %) orchards were below 1 hectare. Mean perimeter-to-area ratios did not differ between databases P0, P1 and P2, for which some orchard contours were redrawn (Kruskall-Wallis test P=0.54, Supplemental Fig. S2).

For all databases, distributions of potential connectivity were bimodal with an important proportion of orchards having a very weak connectivity as compared to the remaining. Based on a percentile plot of the distribution of potential connectivity in database P2 (Supplemental Fig. S3), we defined orchards as isolated when their potential connectivity

was below 0.1. Isolated orchards represented a proportion of 60 % in P0, 31 % in P1, 34 % in P2, 29 % for P3 and P4, and 51 % for P5 and P6. Distributions of potential connectivity in non-isolated orchards are shown in Supplemental Fig. S4. Mean connectivity of non-isolated orchards differs among databases (Kruskall-Wallis, P = 7e-11). Mean connectivity of non-isolated orchards was lower in P0 and P2 relative to P1 (Mann-Whitney, $P < 0.05$) and greater in P2 relative to predicted databases P3-P6 respectively (Mann-Whitney, $P < 0.05$).

The spatial distribution of orchards differed between databases. In the initial database P0, the majority of citrus orchards (57%) were distributed among three main production basins: Le Tampon, Petite-Ile, and Salazie, a circus in the center of the island. The rest was distributed as isolated orchards scattered all around the island (Fig. 1A, white dots). Orchards were distributed across a large altitudinal gradient between 5 m and 1300 m elevation, with the majority (64%) planted below 800 m. In database P2, citrus production appeared as more widely distributed in at least four main production basins: Le Tampon - Petite Ile - Saint-Pierre in the south with a total of 109.9 ha (37.1% of total citrus area), Salazie in the center (37.7 ha, 12.7 %), Saint-Paul in the west (52.8 ha, 17.8 %), and Saint-Benoit in the east (19.7 ha, 6.7%). In addition, regions located between these basins, that formerly appeared as empty of citrus production, now counted some citrus orchards (Bras-Panon at the north-east entrance of Salazie, and Saint-Leu – Avirons – Etang-Salé on the western coast) (Fig. 1A, orange dots). In most areas, even those formerly known as citrus production basins, our perception of citrus orchards distribution has much evolved (compare Fig. 1B and 1C for instance).

Epidemiological simulations

To illustrate the potential differences between cultivated citrus landscapes in terms of epidemiological dynamics, we compared simulated epidemics governed by the same

parameter values in the initial and improved databases (P0 and P2, respectively). Simulations starting from a random orchard in Petite Ile are depicted in Fig. 3. For all simulations settings (databases P0 or P2, 3 km- or 6 km- threshold for the maximal dispersal distance, and Petite-Ile or Le Tampon for the initial contaminated orchards), epidemiological trajectories showed an initial phase of rapid increase in numbers of infected and infectious orchards. Then a phase of stabilization of the number of infectious orchards took place until almost reaching a plateau. None of the simulated epidemics propagated to the whole cultivated citrus landscape over the simulated period. However, simulations differed in the proportion of landscape contaminated after two years, the spatial distribution of the contaminated orchards, and in the speed at which the epidemics stabilized. In database P0, with a dispersal threshold of 3 km (Fig. 3, top left panel), the numbers of infected and healthy orchards stabilized at the end of the simulations: after two years, the epidemics were over with no new infected orchard. No more than 50 orchards were affected, i.e., 34% of the landscape area. Under these conditions, the epidemics was contained in a restricted pocket mainly located in Petite Ile. In the same database, increasing the maximal distance at which psyllid vectors may transmit the disease to 6 km led to an increase in the number of orchards attained, but within the same stabilization period (Fig. 3, top right panel).

In the improved database P2, the number of infected orchards and thus the potential damage of the epidemic did not completely stabilize at the end of the simulation period. (Fig. 3, bottom panels). After two years, for a dispersal threshold of 3 km (resp. 6 km), more than 200 orchards (resp. 400 orchards) were contaminated. Similar results were obtained when the starting point of the epidemic was in Le Tampon (Supplemental Fig. S5).

DISCUSSION

Here we presented a newly acquired dataset describing cultivated citrus landscape in Reunion Island and showed potential consequences of such improved knowledge for the understanding of processes occurring at landscape scale, such as epidemics.

A better knowledge of landscape

A vast improvement of the knowledge of Reunion citrus orchards was obtained by coupling photo-interpretation and field campaigns. Only 27% of area of cultivated citrus identified in the improved database P2 were known in the initial official database P0. Between the years 2018 and 2021, 238, 170, 184 and 114 new orchards were identified and validated. For the Le Tampon region, for example, which had only 42 orchards identified in P0, 165 new orchards were confirmed in total. In the Petite-Ile region, the number of new orchards increased by 102. The total area of cultivated citrus registered in the database is now more compatible with available estimates (Agreste, 2014). Plot contour precision was also improved (explaining a small private area in the official database P0).

Differences between databases P0 and P1 on one hand and P0 and P2 on the other hand stemmed from two causes. The majority of orchards private to P2 were due the discovery of orchards already existing at the time when P0 was edited, but not known from state services. A small number of orchards private to P2 were due to the dynamics of the citrus production landscape. Using past Reunion Google Earth images, we estimate that 12% of orchards in P2 were planted between 2016 and 2021. Currently weak, this turn-over is expected to increase in the next few years due to the age of orchards and farmers with 78% over 40 years old (DAAF Réunion, 2012) in the main citrus production area (Petite-Ile). Changes in the citrus production landscape will also likely accelerate with the progress of the

current HLB epidemics, which provokes tree deaths and removing measures (Arrêté préfectoral 912 du 23 mai 2016). Unless the efforts for photointerpretation and field validation are sustained, it is now urgent to be able to automatically identify citrus orchards.

Performance of algorithmic classification

Here we attempted to calibrate machine-learning algorithms to automatically identify citrus orchards from variables describing the neighboring environment. Unfortunately, this approach met limited success. The classification of the nature of the plots by learning algorithms was not precise enough to become a generalizable method for increasing knowledge of the cultivated citrus landscape and therefore to improve monitoring.

Classification problems may be due to missing some important explanatory variables driving plot statuses. For instance, in our approach policy choices were mainly approximated by estimating land uses in the neighborhood of orchards, but this was a very indirect approach. It would certainly have been better to dispose of variables directly related to policy, e.g., the type and amount of public aids. Another possible issue lies in the high variability in the characteristics of citrus orchards. Reunion harbors 27 species and/or varieties of citrus (several varieties of orange and lemon, kaffir lime, tangor…) implying an important phenotypic variability. There are marked differences in agricultural practices with some farmers specializing in citrus production, and others for whom citrus is a secondary crop, especially in a landscape dominated by sugarcane cultivation (Dupré et al, 2017). A last explanation may be that there is no sufficiently discriminating variable determining orchards presence or absence since a large part of Reunion is globally in a favorable ecological niche for citrus.

Previous attempts at remotely identifying citrus orchards were based on satellite images, a digital terrain model and a land use database. From an object-oriented processing

chain, satellite photos were used to delineate the contours of landscape elements, as well as their dynamics thanks to time series. The improved database P2 produced in the present study was used as reference samples for this classification (Dupuy et al., 2020). The representativity and completeness the reference databases are generally believed to be critical limiting factors of classification methods, (Jolivot et al., 2021). Here despite the large investment underlying the production of P2, automatic remote sensing detection of citrus failed (Dupuy et al., 2020). This attempt and the present study illustrate to difficulty of identifying citrus orchards from satellite and plead for further dedicated work.

Impact of landscape knowledge for epidemics

Improving knowledge on agricultural landscape is important for understanding or predicting any phenomenon strongly impacted by landscape structure. Epidemiological dynamics are one of such phenomena. For example, for the fungal anther-smut, caused by *Microbotryum spp*., it has been shown that among factors structuring disease occurrence, altitude plays a major role (Abbate and Antonovics, 2014). In the case of disease oak wilt, caused by the fungus *Ceratocystis fagacearum*, estimating the economic impacts of control measures requires knowledge of the density of infected oaks, as well as land use, in each quadrat of the study area (Haight et al., 2011). For HLB, citrus production landscape structure has seldom been put forward as an important driver of epidemiological dynamics, because most disease dynamics studies were conducted in either large industrial landscapes (Parnell et al., 2014) or in urban environments (Parry et al., 2014), which are relatively homogeneous. Reunion citrus production landscape presents a myriad of relatively isolated and small orchards, distributed in a variety of ecological conditions. The spatial heterogeneity of citrus landscape is thus much greater than in previously studied contexts.

Epidemiological simulations carried out in the official (P0) and improved (P2) landscapes under various epidemiological scenarios showed that the final number of infected orchards and the disease transient dynamics could significantly differ between the two databases. In database P0, the epidemics did not infect the whole landscape, due to the assumption that transmission is distance-limited. We called the proportion of landscape attained a 'connectivity pocket'. In the improved landscape, the disease escaped the pocket where it was contained in the official landscape and contaminated a greater proportion of orchards. The explanation lies in the addition of orchards that could serve intermediate contamination steps, connecting orchards that would otherwise have been too far to be infected. In particular, some newly identified orchards now link the south of the island, which is both an historical and still very active production area (Petite Ile, 13% of the citrus area), to the west of the island (Saint-Paul municipality, a more recent production basin, 18% of the citrus area). Similarly, the central region of Salazie, which is surrounded by 2000 m-high walls, could have been considered as isolated based on the official database. In the improved landscape, several orchards have been identified along the river flooding from Salazie to the sea, constituting a possible path of entry for the disease.

A thorough epidemiological approach is beyond the scope of this paper. Doing so could require carrying out a sensitivity analysis and estimating the influence of parameters such as the dispersal factor θ. Although a complete analysis of epidemiological scenarios is beyond the scope of the present study, we can already foresee the importance of improving landscape knowledge for understanding disease spread. These findings suggest that disease surveillance could use landscape information to prioritize orchards that are key for disease propagation, either because of their high potential connectivity, or because they are key connection between regions.

ACKNOWLEDGMENTS

This work used images acquired within the framework of the CNES Kalideos device (Réunion site), which benefited from the “Programme Investissements d'Avenir” EQUIPEX of the French “Agence Nationale de la Recherche” on project GEOSUD bearing the reference ANR-10-EQPX-20. The images also required financial support the French Ministry of Agriculture and field data transmitted by the “Syndicat du Sucre de la Réunion” and the “SAFER de la Réunion”. VR received the financial support of the French “Agence Nationale de la Recherche” project NGB (ANR-17-CE32-011). IH and VR were funded by the European Union (European Regional Development Fund, ERDF contract GURDT I2016-1731-0006632), the Conseil Régional de La Réunion, and the Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD). IH received support from French INRAE and ANSES. This study used the facilities provided by the Plant Protection Platform (3P, IBISA), Saint-Pierre, Réunion, France. A special thanks is addressed to the services of the State and the Ministry of Agriculture for their close collaboration by the local DAAF. Thanks also to the FDGDON and the Chamber of Agriculture for the regular exchanges and collaborations in the field. Special thanks to Hugo Santacreu, Maëva Vinot and Arthur Bailly for their help in the citrus orchard hunt.

LITERATURE CITED

Abbate, J.L., Antonovics, J., 2014. Elevational disease distribution in a natural plant–pathogen system: insights from changes across host populations and climate. Oikos 123, 1126–1136.

Arrêté préfectoral N°2012-/1083/SG/DAAF du 23 mai 2016 relatif aux mesures de lutte contre HLB à la Réunion.

Aubert, B., 1988. Le greening, une maladie infectieuse des agrumes, d'origine bactérienne, transmise par des homoptères psyllidés : contribution à l'étude d'une stratégie de lutte appliquée au cas de l'île de la Réunion (thesis). CIRAD-IRFA, s.l.

Batool, A., Iftikhar, Y., Mughal, S.M., Khan, M.M., Jaskani, M.J., Abbas, M., Khan, I.A., 2007. Citrus greening disease - A major cause of citrus decline in the world - A review. Horticultural Science 34, 159–166.

Bové, J.M., 2006. HUANGLONGBING: A DESTRUCTIVE, NEWLY-EMERGING, CENTURY-OLD DISEASE OF CITRUS. Journal of Plant Pathology 88, 7–37.

Breiman, L., 2001. Random Forests. Machine Learning 45, 5–32.

Chaulet Gil. Agreste La Réunion, Septembre 2014, n° n°92. - 12 p.

Costa, H.S., Raetz, E., Pinckard, T.R., Gispert, C., Hernandez-Martinez, R., Dumenyo, C.K., Cooksey, D.A., 2004. Plant Hosts of Xylella fastidiosa In and Near Southern California Vineyards. Plant Disease 88, 1255–1261.

Cunniffe, N.J., Koskella, B., E. Metcalf, C.J., Parnell, S., Gottwald, T.R., Gilligan, C.A., 2015a. Thirteen challenges in modelling plant diseases. Epidemics, Challenges in Modelling Infectious DIsease Dynamics 10, 6–10.

Cunniffe, N.J., Stutt, R.O.J.H., DeSimone, R.E., Gottwald, T.R., Gilligan, C.A., 2015b. Optimising and Communicating Options for the Control of Invasive Plant Disease When There Is Epidemiological Uncertainty. PLOS Computational Biology 11, e1004211.

DAAF Réunion, 2012. https://daaf.reunion.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/GAR-2012-LaReunion-MaquetteInternet_cle0ae949.pdf.

Dupré, M., Michels, T., Le Gal, P.-Y., 2017. Diverse dynamics in agroecological transitions on fruit tree farms. European Journal of Agronomy 90, 23–33.

Dupuy, S., Gaetano, R., Le Mézo, L., 2020. Mapping land cover on Reunion Island in 2017 using satellite imagery and geospatial ground data. Data in Brief 28, 104934.

Fick, S.E., Hijmans, R.J., 2017. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. International Journal of Climatology 37, 4302–4315.

Garnier, M., Bové, J.M., 1996. Distribution of the Huanglongbing (Greening) Liberobacter Species in Fifteen African and Asian Countries. International Organization of Citrus Virologists Conference Proceedings (1957-2010) 13.

Haight, R.G., Homans, F.R., Horie, T., Mehta, S.V., Smith, D.J., Venette, R.C., 2011. Assessing the Cost of an Invasive Forest Pathogen: A Case Study with Oak Wilt. Environmental Management 47, 506–517.

Hanski, I., 1998. Metapopulation dynamics. Nature 396, 41.

Jolivot, A., Lebourgeois, V., Leroux, L., Ameline, M., Andriamanga, V., Bellón, B., Castets, M., Crespin-Boucaud, A., Defourny, P., Diaz, S., Dieye, M., Dupuy, S., Ferraz, R., Gaetano, R., Gely, M., Jahel, C., Kabore, B., Lelong, C., le Maire, G., Lo Seen, D., Muthoni, M., Ndao, B., Newby, T., de Oliveira Santos, C.L.M., Rasoamalala, E., Simoes, M., Thiaw, I., Timmermans, A., Tran, A., Bégué, A., 2021. Harmonized in situ datasets for agricultural land use mapping and monitoring in tropical countries. Earth System Science Data 13, 5951–5967.

Karger, D.N., Schmatz, D.R., Dettling, G., Zimmermann, N.E., 2020. High-resolution monthly precipitation and temperature time series from 2006 to 2100. Sci Data 7, 248.

Kuhn, M., 2008. Building Predictive Models in R Using the caret Package. Journal of Statistical Software 28, 1–26.

Martinetti, D., Soubeyrand, S., 2018. Identifying Lookouts for Epidemio-Surveillance: Application to the Emergence of Xylella fastidiosa in France. Phytopathology 109, 265–276.

Meentemeyer, R.K., Haas, S.E., Václavík, T., 2012. Landscape Epidemiology of Emerging Infectious Diseases in Natural and Human-Altered Ecosystems. Annual Review of Phytopathology 50, 379–402.

Meyer, D., 2020. Support Vector Machines. The Interface to libsvm in package e1071.

Parnell, S., Gottwald, T.R., Gilligan, C.A., Cunniffe, N.J., van den Bosch, F., 2010. The Effect of Landscape Pattern on the Optimal Eradication Zone of an Invading Epidemic. Phytopathology 100, 638–644.

Parnell, S., Gottwald, T.R., Riley, T., Bosch, F. van den, 2014. A generic risk-based surveying method for invading plant pathogens. Ecological Applications 24, 779–790.

Parnell, S., van den Bosch, F., Gottwald, T., Gilligan, C.A., 2017. Surveillance to Inform Control of Emerging Plant Diseases: An Epidemiological Perspective. Annual Review of Phytopathology 55, 591–610.

Parry, M., Gibson, G.J., Parnell, S., Gottwald, T.R., Irey, M.S., Gast, T.C., Gilligan, C.A., 2014. Bayesian inference for an emerging arboreal epidemic in the presence of control. Proceedings of the National Academy of Sciences 111, 6258–6262.

Soubeyrand, S., Laine, A. -L., Hanski, I., Penttinen, A., Keeling, A.E.M.J., DeAngelis, E.D.L., 2009. Spatiotemporal Structure of Host-Pathogen Interactions in a Metapopulation. The American Naturalist 174, 308–320.

You, L., Wood, S., 2005. Assessing the spatial distribution of crop areas using a cross-entropy method. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, Bridging Scales and Epistemologies 7, 310–323.

TABLES

Table 1. Comparison between prediction attempts

Obtained database	Original database	Algorithm	Mean accuracy	Mean sensibility	Mean specificity
P3	P2	SVM	0.77	0.78	0.74
P4	P2	RF	0.79	0.82	0.75
P5	P0	SVM	0.74	0.77	0.68
P6	P0	RF	0.75	0.81	0.62

FIGURES LEGENDS

Fig. 1. (A) Map of the centroids of the citrus orchards initially officially identified (database P0 in white) and resulting from the photo-interpretation work (database P2 in orange). Orchard positions have been randomly modified (but with conservation of the region of origin) to comply with data protection rules. The grey and blue curves represent the contour lines and isohyets respectively. (B and C) Closer look at a small production region (location not revealed to comply with data protection rules). Polygons encircled by a black line represent the citrus orchards of the same area from the official data (P0 in white in B) and from the photo-interpretation work (P2 in orange in C) respectively. Other polygons represent land use categories available in the official agricultural database.

Fig. 2. Citrus areas shared between and specific to databases. The first three bars represent the improvements of the official database P0 by compilation (P1) and photo-interpretation (P2). The other bars compare the areas between the database P2 obtained by photo-interpretation and those from machine learning (P3-P6).

Fig. 3. Simulated epidemiological dynamics in the official (P0) and improved (P2) citrus production landscapes under two scenarios of psyllid dispersal limitation (3 vs 6 kilometers). For each panel, the left graphs represent the dynamics of the average number of orchards in each health status over 10 replicate runs. Simulations are stochastic but the variability among runs is so small that it cannot be represented. The healthy (S), infected but not infectious (E), and infectious states (I) are represented by the colors green, orange and red, respectively. The simulations start in an orchard in Petite Ile. The right maps represent the distribution of orchards as well as their status at the territory scale at the last time step in one of the ten replicate simulations.

FIGURES

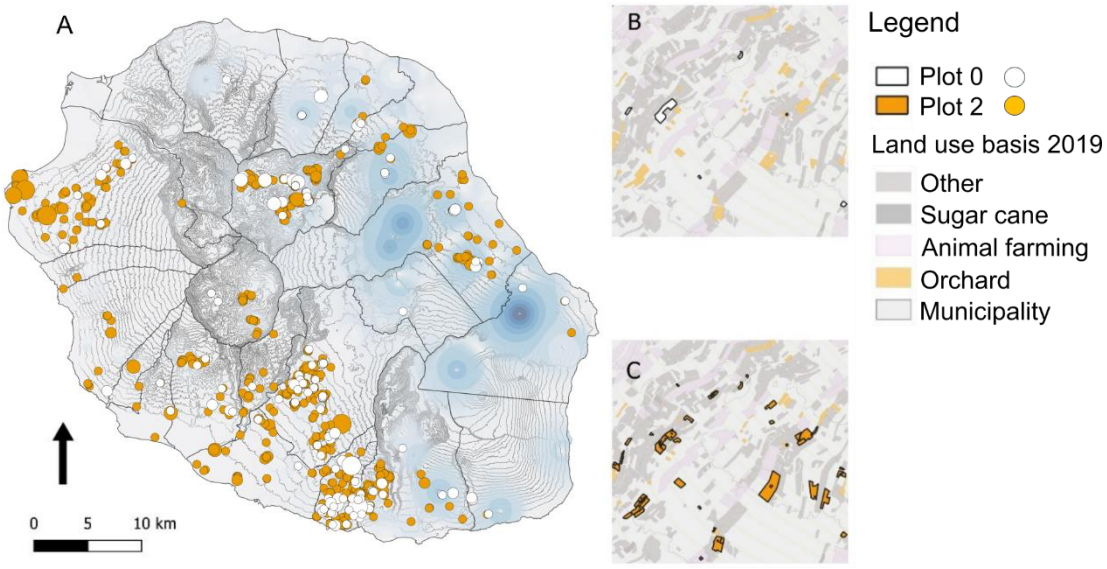


Fig. 1. (A) Map of the centroids of the citrus orchards initially officially identified (database P0 in white) and resulting from the photo-interpretation work (database P2 in orange). Orchard positions have been randomly modified (but with conservation of the region of origin) to comply with data protection rules. The grey and blue curves represent the contour lines and isohyets respectively. (B and C) Closer look at a small production region (location not revealed to comply with data protection rules). Polygons encircled by a black line represent the citrus orchards of the same area from the official data (P0 in white in B) and from the photo-interpretation work (P2 in orange in C) respectively. Other polygons represent land use categories available in the official agricultural database.

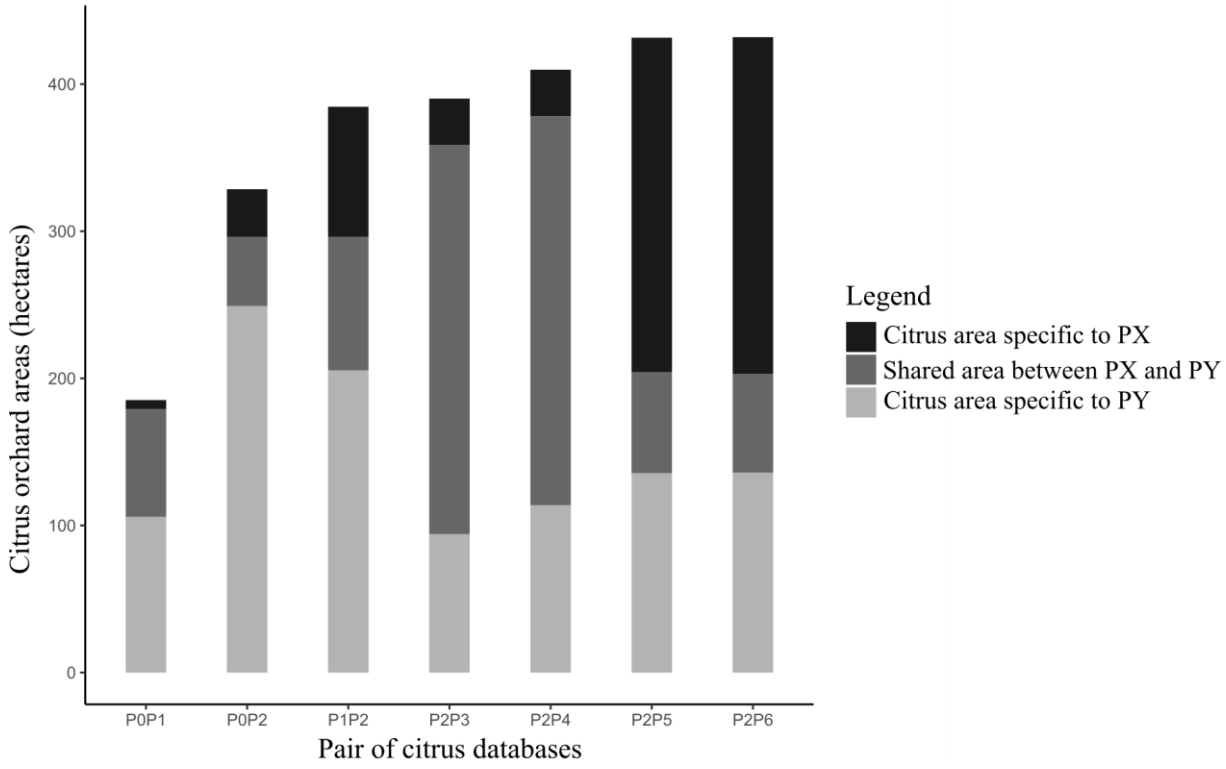


Fig. 2. Citrus areas shared between and specific to databases. The first three bars represent the improvements of the official database P0 by compilation (P1) and photo-interpretation (P2). The other bars compare the areas between the database P2 obtained by photo-interpretation and those from machine learning (P3-P6).

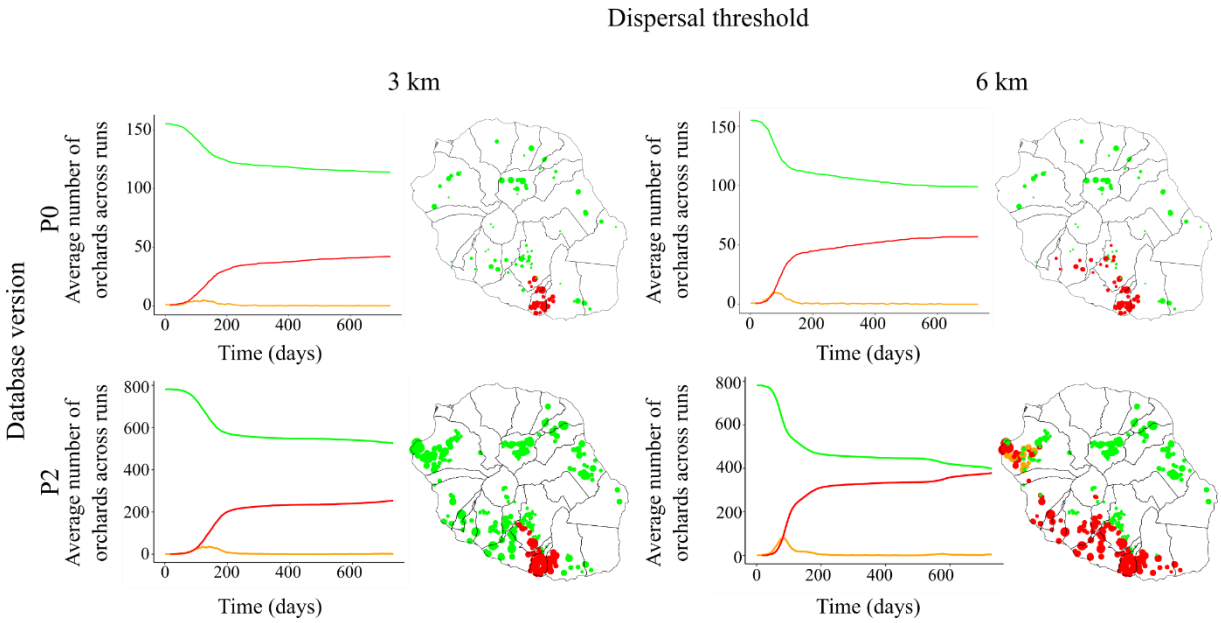
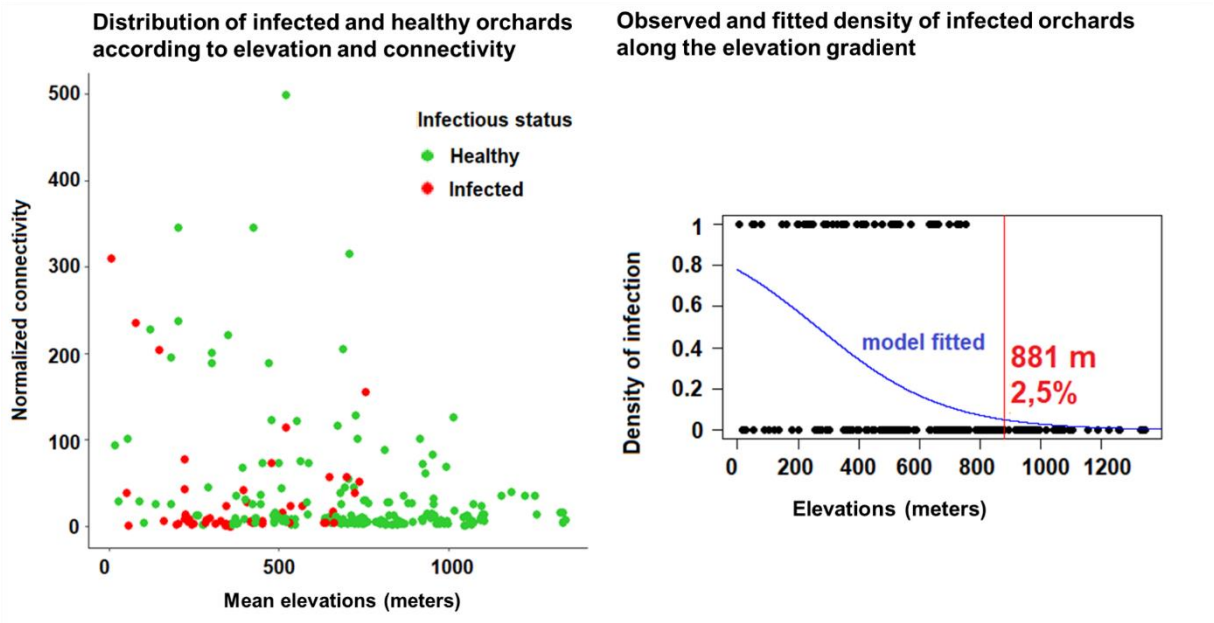


Fig. 3. Simulated epidemiological dynamics in the official (P0) and improved (P2) citrus production landscapes under two scenarios of psyllid dispersal limitation (3 vs 6 kilometers). For each panel, the left graphs represent the dynamics of the average number of orchards in each health status over 10 replicate runs. Simulations are stochastic but the variability among runs is so small that it cannot be represented. The healthy (S), infected but not infectious (E), and infectious states (I) are represented by the colors green, orange and red, respectively. The simulations start in an orchard in Petite Ile. The right maps represent the distribution of orchards as well as their status at the territory scale at the last time step in one of the ten replicate simulations.

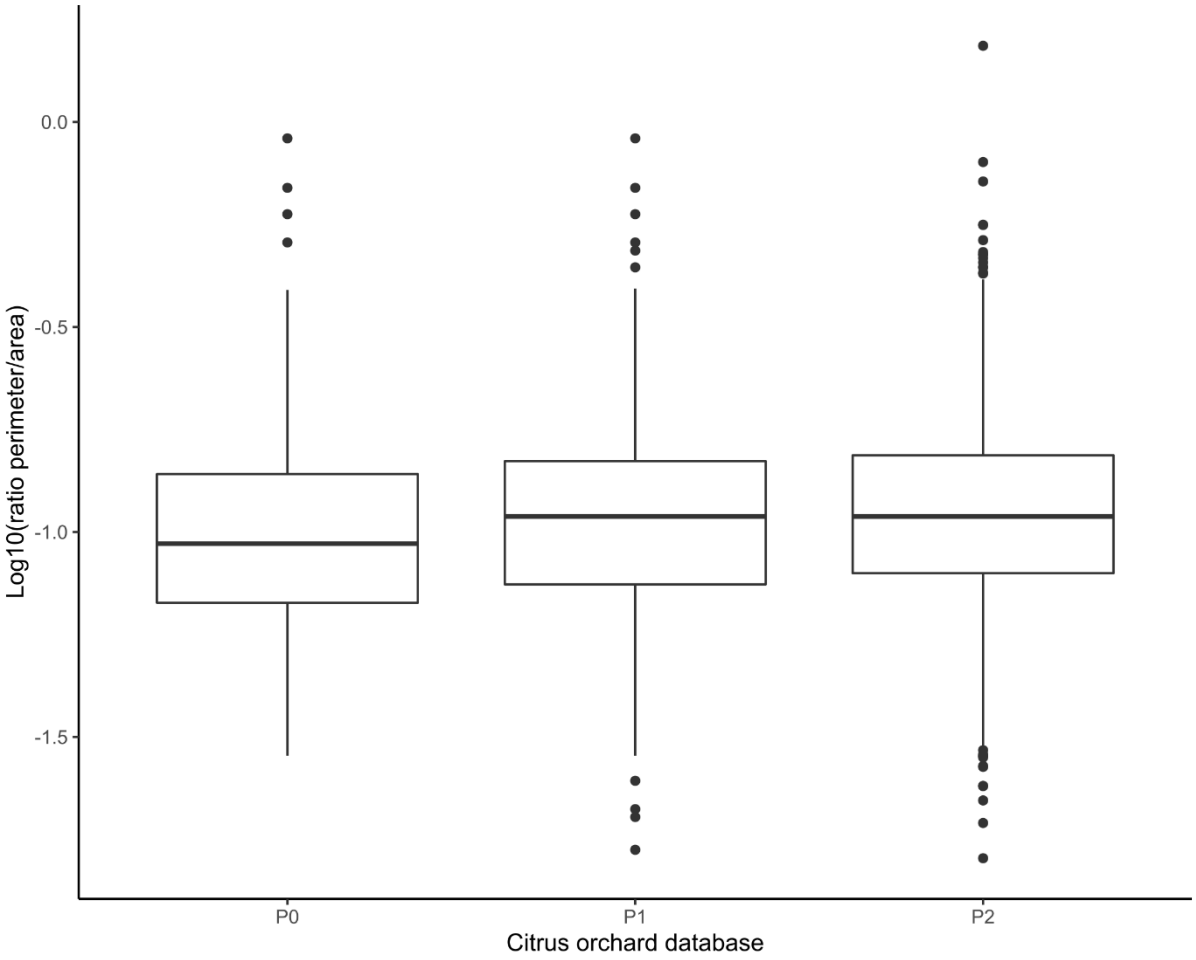
SUPPORTING MATERIAL

Supplementary Table S1: List of parameters used to model HLB epidemics in the different landscape versions.

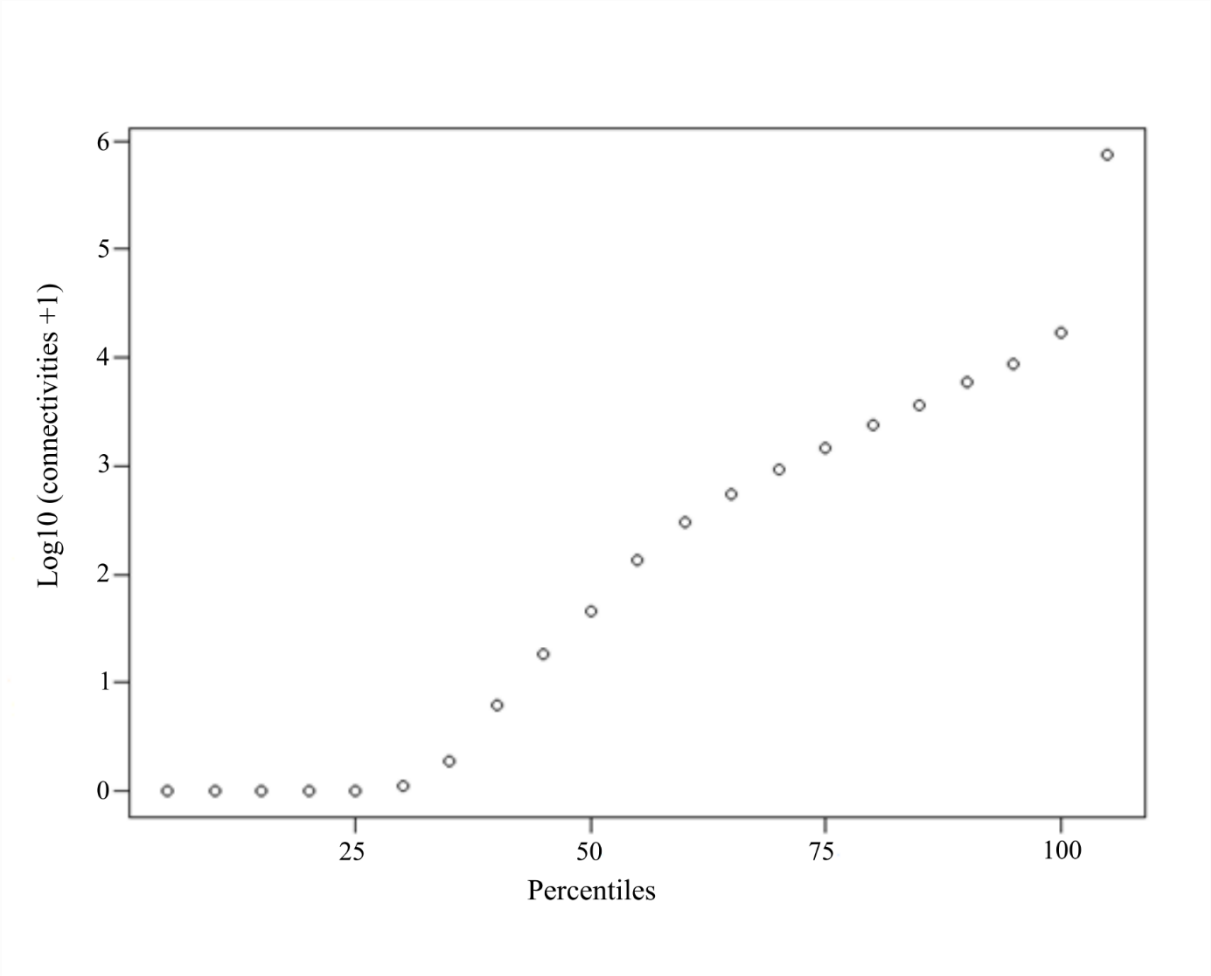
Parameters	Values	Units
Time (t)	Range [0-730]	days
Latency	15	days
Maximal dispersal distance threshold	3 or 6	kilometers
Altitude threshold	881	meters
θ	0.0005	meters^{-1}
r	0.0056	days^{-1}
Infectious period	730	days
K	1	-
t_{inf}	-	days
α_0	0.0083	-



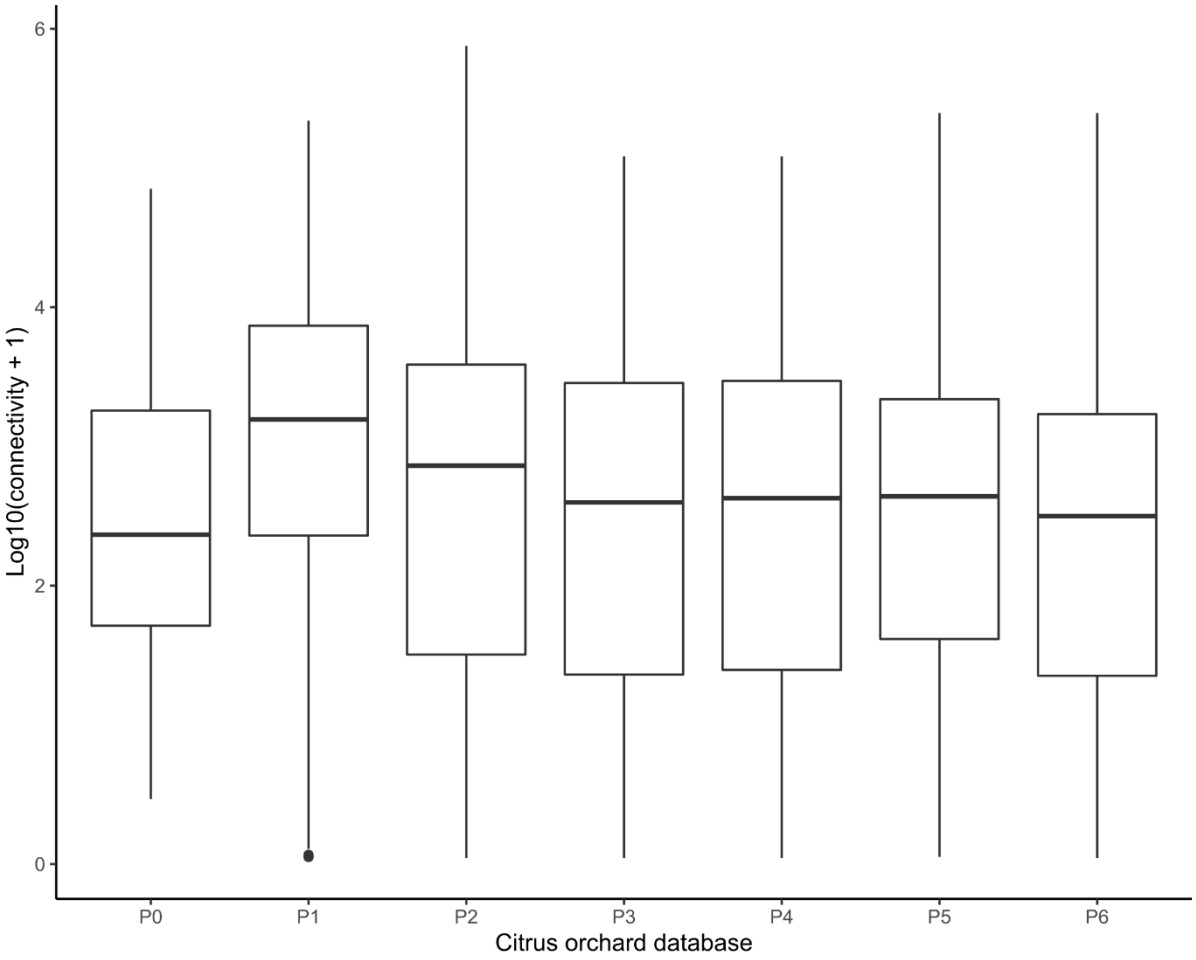
Supplementary figure S1. A generalized linear model was used to test the correlation between orchard connectivity (Ci), and the presence / absence records of the disease, accounting for possible elevations gradients. We find a significant relationship between orchard connectivity and the presence of the disease (P = 0.021). Our model highlights a strong correlation between presence of the disease and elevations (P = 2.02 e -10). The propagation of the disease does not exceed a threshold elevation (724 meters (observed), 881(predicted) roughly corresponding to the known niche limits of psyllid vectors). Houillon et al., 2020. Influence of the agricultural landscape structure on the spread of a disease: the case of citrus greening in Reunion Island. Figure taken from a poster presented at the Anses Scientific and Doctoral Days (JSDA, 18-19 March, 2020).



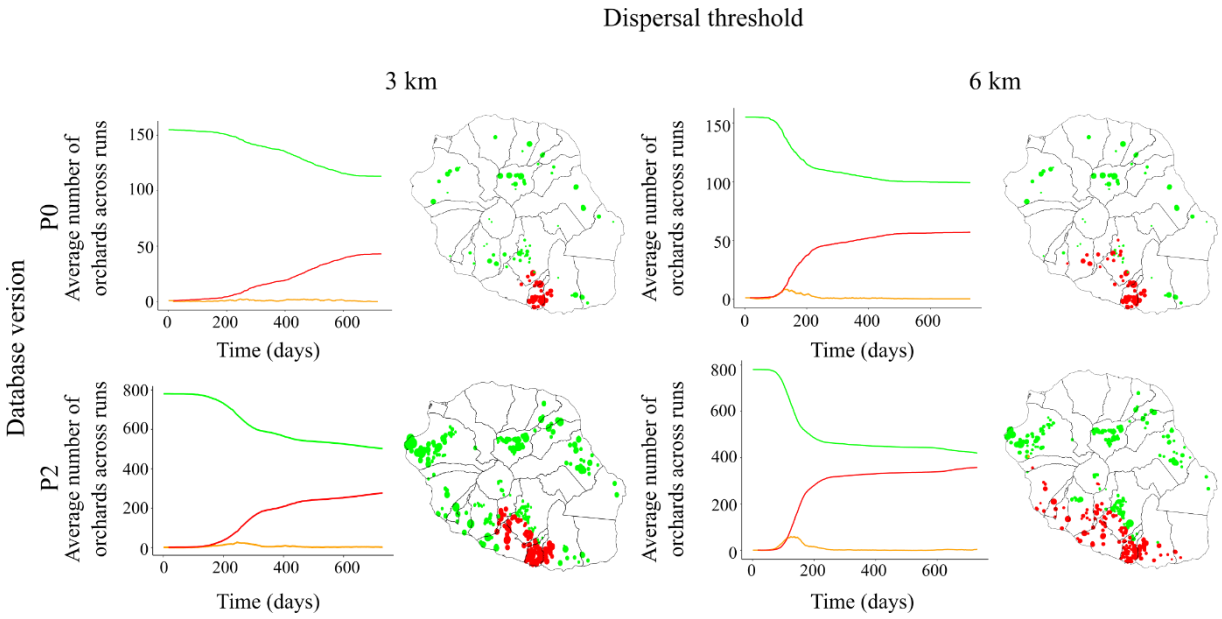
Supplementary figure S2. Distributions of the log-transformed perimeter-to-area ratio in the studied citrus orchard databases. P0 is the official database. P1 is the compilation of unofficial and official databases. P2 is the database resulting from photointerpretation and field work.



Supplementary figure S3. Percentile plot of log-transformed potential connectivity of in database P2. It is visible that the distribution of potential connectivity shows an excess of very weak values: 34% of all orchards have a potential connectivity below 0.1.



Supplementary figure S4. Distributions of the log-transformed potential connectivity in non-isolated citrus orchards. P0 is the official database. P1 is the compilation of unofficial and official databases. P2 is the database resulting from photointerpretation. P3 and P4 are resulting from machine learning algorithms, respectively SVM and RF, having learned from P2. P5 and P6 are resulting from machine learning algorithms, respectively SVM and RF, having learned from P0.



Supplementary figure S5. Simulated epidemiological dynamics in the official (P0) and improved (P2) citrus production landscapes under two scenarios of psyllid dispersal limitation (3 vs 6 kilometers). For each panel, the left graphs represent the dynamics of the average number of orchards in each health status over 10 replicate runs. Simulations are stochastic but the variability among runs is so small that it cannot be represented. The healthy (S), infected but not infectious (E), and infectious states (I) are represented by the colors green, orange and red, respectively. The simulations start in an orchard in Le Tampon. The right maps represent the distribution of orchards as well as their status at the territory scale at the last time step in one of the ten replicate simulations.

CHAPITRE 2B : Inférence du risque

1. Introduction

Avec la mondialisation, les échanges globaux se sont généralisés décuplant les mouvements de végétaux et surtout des agents pathogènes de végétaux. Ces échanges commerciaux contribuent aux émergences de maladies infectieuses, impliquant parfois des pertes économiques importantes. Les pertes alimentaires mondiales dues aux maladies de plantes sont par exemple estimées à 10% de la production totale (Strange et Scott, 2005). En 2007, dans le seul état de la Géorgie (USA), cela représentait des pertes d'environ 540 millions de dollars (Martinez, 2007).

Pour faire face et lutter efficacement, il est nécessaire d'anticiper le risque d'émergence et donc de mener une surveillance rigoureuse des maladies des plantes. Définie comme la collecte et l'analyse systématique et continue de données de statut sanitaire de plantes (Last, 2001), la surveillance s'appuie donc sur la capacité à détecter la présence ou l'absence d'une maladie chez un hôte.

Depuis un peu moins de 10 ans, un nouveau paradigme de surveillance émerge en santé des plantes : la surveillance basée sur le risque. Notons qu'utiliser la notion de risque pour détecter au plus tôt la survenance d'un danger était auparavant relativement classique. Par exemple, des études en criminologie préventive font déjà état de cette notion dans les années 90 (Deflem, 1997). C'est aussi le cas en médecine préventive avec des études sur le risque du cancer colorectal présentant l'intérêt d'effectuer de la détection précoce pour maximiser les chances de succès de traitement (Helm et Sandler, 1999). En santé animale, des études de facteurs de risques existaient déjà dans les années 2000. Norström *et al*. (2000), s'intéressaient, à cette période, au lien entre des caractéristiques de troupeaux bovins et le risque d'épidémie de maladie respiratoire aiguë au sein de ces derniers. Développée par Parnell *et al*. (2014) pour la santé des plantes, la surveillance basée sur le risque consiste à orienter la surveillance en estimant la probabilité de présence d'une maladie à un endroit donné. Elle consiste, dans un premier temps, à inférer les effets de variables éco-climatiques sur le taux de reproduction de base R_0 d'une maladie. A partir de ce R_0 connu en chaque point de l'espace, dans un second temps, des simulations d'épidémies peuvent être effectuées. Grâce à cette méthode, il est possible de proposer une cartographie du risque et d'évaluer différentes stratégies de surveillance. Par exemple, dans la surveillance de la bactérie *Xyllela fastidiosa* dans le sud de la France, les territoires à fort risque de passage de l'épidémie (intégrant une mesure d'à quel point le milieu est favorable et la connectivité des milieux favorables) ont pu être identifiés pour les surveiller en priorité (Martinetti et Soubeyrand, 2018). Cependant, jusqu'à présent, les exemples d'application de la surveillance basée sur le risque, notamment sur *X. fastidiosa* et sur le Huanglongbing (HLB) en Floride, se sont faits sur des jeux de données très fournis dans le temps et dans l'espace, notamment pour cartographier le risque. Or paradoxalement ces méthodes ont pour vocation d'être utilisées le plus tôt

possible dans le déroulement d'une épidémie et donc, dans un grand nombre de cas, avec peu de données locales à disposition.

Le HLB est la plus grande menace qui pèse sur les productions d'agrumes dans le monde. Il s'agit d'une maladie systémique causée par des bactéries du genre *Candidatus* Liberibacter, dont la présence dans la plante provoque des dépôts de callose qui obstruent les vaisseaux de sève (Sechler *et al*., 2009). Les deux vecteurs principaux de la maladie sont deux espèces de psylles, *Diaphorina citri* et *Trioza erytreae* (Aubert, 1989). L'étendue de la maladie est estimée à 60 millions d'arbres touchés dans le monde avec une mort systématique, aucun traitement n'existant à ce jour. C'est pourquoi l'investissement dans la recherche pour trouver une solution face au HLB est colossal avec 31,5 millions de dollars investis en 2014 pour le département américain de l'agriculture (USDA) (Lush, 2014).

A la Réunion, une réémergence du HLB a été observée depuis 2015 et une surveillance officielle s'est mise en place la même année. Cependant, cette surveillance est menée par un faible nombre d'agents aux vues des nombreuses autres missions qu'ils ont à accomplir. De plus, le paysage hétérogène et fragmenté était initialement mal connu et la structure de ce dernier se retrouvait inexploitée dans la surveillance de la maladie. Or dans un contexte de réémergence possiblement multi foyers, il apparaissait nécessaire de pouvoir cartographier la maladie à l'échelle du paysage. Par le travail de cartographie réalisé précédemment (Houillon *et al*., soumis, chapitre 2A), la connaissance de la structure du parcellaire agrumicole peut être mise au service de l'orientation de la surveillance.

Dans cette étude, nous avons commencé à cartographier le risque que présente le HLB sur le territoire réunionnais. Pour ce faire nous avons cherché à mettre en relation les données de présence et d'absence de la maladie obtenues par la surveillance avec des variables décrivant l'environnement : les conditions éco-climatiques de température, d'altitude, d'exposition au vent, de pente, de pluviométrie et de nature des sols, ainsi que la cartographie des vergers d'agrumes et des cultures aux alentours des parcelles. Nous avons testé différents modèles, issus d'algorithmes d'apprentissage, pour établir les variables les plus explicatives de la prévalence du HLB dans les parcelles d'agrumes. Puis, nous avons extrapolé cette première mesure de risque sur l'ensemble de l'île.

2. Matériel et Méthodes

2.1. Données de surveillance du HLB et variables éco-climatiques

Les données de présence -absence de la maladie sont issues de deux sources. D'une part, les données de la surveillance officielle proviennent de prélèvements sur le terrain, dans des vergers de production d'agrumes menés par la FDGDON (Fédération Départementale des Groupements de Défense contre les Organismes Nuisibles), qui est l'OVS (Organisme à Vocation Sanitaire) délégataire de la DAAF de la Réunion (Direction de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Forêt). Au sein d'une parcelle, le protocole suivi consiste à prélever des échantillons de 60 arbres par hectare (environ 30 arbres par parcelle) avec 15 feuilles par arbre, prélevées dans toutes les directions. Pour le diagnostic moléculaire (réalisé par la Clinique du Végétal, le laboratoire agréé de la Réunion), les arbres sont rassemblés par lot de 10 (environ trois lots par parcelle donc). Le broyat issu de chaque lot est soumis à un test moléculaire. Avant la publication de la nouvelle méthode en 2021, il s'agissait de la méthode officielle alors en cours qui reposait sur une PCR classique. A partir de juin 2021, la nouvelle méthode officielle basée sur une PCR en temps réel a été appliquée. Les données sont donc des statuts sanitaires par lot (MA063 version 1, ANSES, 2021). D'autre part, des données supplémentaires ont été produites par le CIRAD lors de travaux de recherches en appui à la surveillance officielle, basées sur la PCR en temps réel. Ces échantillons sont constitués de plusieurs feuilles d'un seul arbre, et incluent des prélèvements dans les parcelles expertisées par la FDGDON, des arbres isolés, de bord de route, ou dans des jardins de particuliers (Melot, 2021). Ces prélèvements ont été traités par PCR en temps réel. En combinant les jeux de données, un total de 2153 échantillons géolocalisés ont été évalués positifs ou négatifs au HLB, entre 2015 et 2021.

Dans cette étude, du fait de l'hétérogénéité des modes de production des diagnostics et de la philosophie des échantillonnages, nous avons choisi d'agréger ces statuts sanitaires au niveau des parcelles, c'est-à-dire que lorsqu'au moins un arbre évalué est positif sur la parcelle, cette dernière est considérée comme infectée. La parcelle est considérée comme saine s'il y a eu des prélèvements dessus et qu'ils sont tous négatifs. Les parcelles correspondent aux parcelles d'agrumes du parcellaire P2 issu de la photo-interprétation et de la vérification sur le terrain (Houillon *et al*., soumis, chapitre 2A). Ainsi 782 parcelles d'agrumes, dont 345 avec un statut sanitaire ont été utilisées pour l'inférence du risque (Fig.1). De même, comme la surveillance officielle avait pour but de cartographier la présence de la maladie sur plusieurs années, il existe très peu de parcelles suivies dans le temps. Les parcelles échantillonnées changent constamment au cours du déroulement de la surveillance. Dès lors, on n'utilisera pas les dates des prélèvements, mais uniquement les coordonnées géographiques des statuts sanitaires.

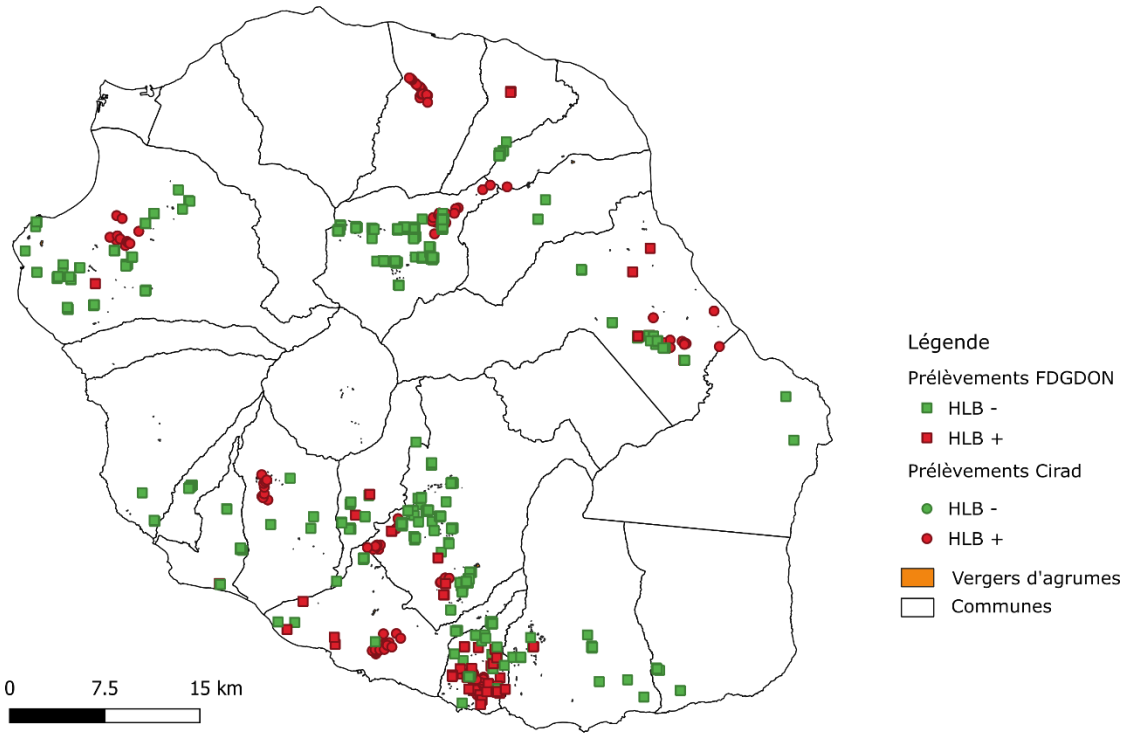


Figure 1 : Cartographie des prélèvements effectués pour la détection du HLB à la Réunion. Les carrés et les ronds représentent les positions des prélèvements, respectivement de la FDGDON (données officielles), du Cirad (données de recherche). Les polygones oranges illustrent les vergers d'agrumes géoréférencés issus de la base de données P2. Les coordonnées ont été bruitées aléatoirement pour le respect de la protection des données privées.

Pour chaque parcelle, grâce aux coordonnées GPS du centroïde, nous avons extrait dans des couches d'information géographique disponibles sur l'atlas en ligne du Cirad AWARE (Atlas Web Agricole pour la Recherche) (https://aware.cirad.fr), les variables suivantes :

- La couche Litto3D®, issue du Modèle d'Elévation Numérique en coproduction avec l'institut géographique national français (IGN) et le SHOM (Service Hydrographique et Océanographique Marin) a permis d'obtenir l'altitude en mètres et la pente moyenne pour chaque parcelle.
- Les données de température de 73 stations météorologiques du Cirad et de Météo-France entre 1987 et 2017 ont été interpolées par M. Mezino et ont permis d'avoir la température annuelle (i) minimale, (ii) moyenne et (iii) maximale.
- Les couches produites par M. Mezino à partir de 143 stations météorologiques du Cirad et de Météo-France ont permis de recueillir les informations sur la pluviométrie. Ces couches sont

composées des isohyètes (i) des précipitations minimales observées dans les 20% des années les plus humides entre 1986 et 2016, (ii) des précipitations minimales observées dans les 20% des années les plus sèches de cette période et (iii) des précipitations annuelles médianes également sur la période 1986-2016. Les isohyètes des précipitations annuelles médianes les plus proches du centroïde de chaque parcelle sont retenues.

- A partir de la classification supervisée d'images satellites Pléiades 2018 (Dupuy et Gaetano, 2019), les différentes utilisations des sols autour des parcelles ont été obtenues.
- La couche de la pédologie de la Réunion au 1/50000 a été implémentée. Il s'agit de la classification des types de sol proposée par Denis Pouzet sur la base de la classification de Michel Raunet (1991). Elle répertorie également l'exposition aux vents sur le territoire de la Réunion.
- Les bilans climatiques en année quinquennale humide et sèche (différence Pluie-Evapotranspiration Potentielle (ETP)) sur la zone cultivable de La Réunion ont été calculés par M. Mezino à partir des séries climatiques quotidiennes (10 années) de précipitations et d'ETP d'octobre 2002 à septembre 2012 de la base climatique MétéoR du Cirad. Ces bilans représentent la quantité de pluie disponible pour les plantes.
- La base de données géoréférencées produite lors de ma thèse et présentée dans le chapitre 2A (Houillon *et al*., 2022, chapitre 2A) est ensuite utilisée pour calculer la distance au plus proche jardin de particulier échantillonné, la surface des parcelles et leur périmètre.
- La commune de chaque verger a été ajoutée aux variables.

Tous ces traitements ont été réalisés avec le logiciel de traitement d'information géographique QGIS 3.10®. Le choix des variables d'altitude, de température et de pluviométrie est en relation avec la biologie du vecteur (Nava *et al*., 2007 ; Liu et Tsai, 2000 ; Bové and Garnier, 1984). Les cultures environnantes aux parcelles d'agrumes sont également utilisées comme variables car les populations des psylles ne sont pas quantifiées ni cartographiées à la Réunion, et il a été démontré que ces vecteurs peuvent avoir des grandes variations dans leur distance de dispersion qui sont influencées par d'autres plantes attractives ou non (Tomaseto *et al*., 2015).

2.2. Tri des variables

Les variables récupérées pour chaque parcelle étant à la fois qualitatives (la commune, le type de sol, l'exposition au vent) et quantitatives (la surface, le périmètre, la pente, la température, le bilan climatique, l'altitude, la distance à un jardin particulier, la quantité de pluie médiane et la connectivité), une analyse factorielle de données mixtes (FAMD) a été réalisée (Pagès, 2004). Les packages

FactoMiner et *factoextra* ont été utilisés sous R (R Core Team, 2018) afin d'effectuer et d'analyser les résultats de la FAMD. Pour pouvoir faire un choix parmi les variables quantitatives, la matrice des corrélations a été calculée avec le package R *corrplot* (Wei et Simko,2021). Ainsi les variables les plus pertinentes pour expliquer la présence ou l'absence de la maladie, par différents modèles, ont été sélectionnées.

Afin de quantifier l'influence spatiale des différentes catégories d'occupation des sols, le package R *siland* a été utilisé (Carpentier et Martin, 2021). Cela permet de déterminer le rayon d'influence maximal autour d'une parcelle de chacun des types d'occupation des sols par calcul de vraisemblance. La densité de chacun des types d'occupation du sol a ensuite été calculée dans leur rayon optimal respectif autour de chaque parcelle d'agrumes.

2.3. Liens entre présence/absence de la maladie et des variables du parcellaire

Dans cette section, nous avons regardé si les mesures du paysage, à savoir la connectivité potentielle et le ratio périmètre sur aire, peuvent être mises en relation avec la présence ou l'absence de la maladie par des modèles linéaires généralisés (McCullagh et Nelder, 1987). Les modèles sont comparés par sélection séquentielle par addition (méthode *forward*). La connectivité a été calculée comme proposé par Saura et Pascual-Hortal (2007) et par Avon et Bergès (2014) :

$$PC_i = \frac{\sum_j a_i a_j B e^{-\theta d_{ij}}}{A_L^2} \qquad (1)$$

où a_i et a_j sont les aires des parcelles i et j, d_{ij} la distance entre les centroïdes des parcelles i et j, A_L l'aire de la zone considérée (ici l'île de la Réunion donc ramené à 1) et θ le facteur de dispersion. B peut être considéré comme égal à θ, qui est la constante de normalisation de la distribution exponentielle des distances de dispersion. Le facteur de dispersion θ s'interprète comme l'inverse de la distance moyenne de dispersion. Il est donc fortement lié aux capacités de vols des psylles vecteurs. Si sa valeur a été estimée à 0,1 m^{-1} dans des jardins de particuliers en Floride (Parry *et al*., 2014) correspondant à une dispersion moyenne de 20 mètres, *D. citri* a également des capacités de vols longue distance de l'ordre de 2,5 km (Martini *et al*., 2014), soit θ = 8E-4. Pour rendre compte de la dispersion à courte et longue distance, deux valeurs de connectivités potentielles ont été calculées avec ces deux valeurs de θ.

2.4. Prédiction du statut sanitaire des parcelles d'agrumes

Des modèles de prédiction du statut sanitaire des parcelles d'agrumes ont été implémentés sous R, avec des algorithmes d'apprentissage : Machine à Vecteurs de Support (SVM) et Forêt d'arbres aléatoires (RF), respectivement avec les packages R *e1071* v 1.7-4 (Meyer *et al*., 2020) et *randomForest* v 4.6-14 (Breiman *et al*., 2018). De la même manière que dans le chapitre 2A, une validation croisée a été effectuée pour les deux algorithmes d'apprentissage, avec 75% des données d'apprentissage, prises aléatoirement selon une distribution uniforme, qui servent à entrainer le modèle et 25% à le tester. Le processus est répété 10 fois pour chaque modèle. Puis les paramètres de classification validés ont été utilisés pour prédire le statut sanitaire de 347 parcelles non échantillonnées.

2.5. Inférence du risque à l'échelle du territoire

Le risque, tel que défini par Parnell *et al*. (2014), est calculé comme le produit du taux de reproduction R_{0_i} et de la probabilité P_i d'arrivée de la maladie à chaque localisation *i* d'un hôte :

$$w_i = R_{0_i} \times P_i \qquad (2).$$

La probabilité P_i que la maladie se répande à la parcelle *i* dépend de la connectivité de la parcelle *i* et des capacités de dispersion de l'agent pathogène et donc ici du vecteur. En suivant la même logique que dans le chapitre 2A, cette probabilité est définie selon l'équation suivante :

$$P_i = 1 - e^{-K \sum_j \frac{\sqrt{a_j}}{d_{ij}} \times p_{ij} \times a_i} \qquad (3)$$

avec K, une constante traduisant la transmissibilité de la maladie par les vecteurs, qui est fixée ici à 1. a_j et a_i sont les surfaces des parcelles *j* et *i*, la surface de la parcelle *i* étant ramenée à une portion d'arc de couronne dans le rayon de transmission de la maladie depuis une parcelle *j* infectieuse. d_{ij} est la distance entre ces deux parcelles et p_{ij} le noyau de dispersion entre ces deux localisations dépendant de θ.

Dans cette partie, R_{0_i} et θ sont vus comme des paramètres inconnus, propres à l'épidémie de HLB à la Réunion et ont été calculés. Dans notre étude, le taux de reproduction global est constant quel que soit la parcelle. Ainsi le risque w_i est calculé grâce à la formule (2) pour chaque parcelle *i* avec un relevé de HLB, cette évaluation du risque contenant deux inconnus R_0 et θ. Ensuite, ce risque calculé a été comparé au risque observé (ou, autrement dit, à la survenue effective ou pas du danger) W_i dans les parcelles échantillonnées, à savoir 0 si le HLB n'a pas été trouvé et 1 dans le cas contraire. La somme *D* des valeurs absolues de différences entre risque observé et risque calculé en chaque localisation *i* est définie ainsi :

$$D = \sum_{i=0}^{N} |W_i - w_i| \qquad (4)$$

Les valeurs de R_0 et θ pour lesquelles *D* est minimale sont celles qui rapprochent le plus risque calculé et risque observé. Pour les calculer, une fonction d'optimisation de R (optim) a été utilisée à partir de valeurs de R_0 et θ issues de la littérature (R_0= 5 chez Gao *et al*., 2018 ; θ = 0,1 chez Parry *et al*., 2014). Une fois ces valeurs calculées, le risque calculé est un risque estimé. Ces valeurs ont ensuite servi à extrapoler le risque sur l'ensemble du territoire réunionnais par krigeage (fonction kde2d).

3. Résultats

3.1. Tri des variables

L'analyse factorielle de données mixtes explique 19,7% de la variance par ses deux principales dimensions (Fig.2). La première dimension montre l'importance des mesures de températures et des variables de pédologie. De plus, l'altitude et la commune de la parcelle entrent en compte. Les communes participent d'ailleurs le plus à la deuxième dimension puis ce sont les précipitations et de nouveau les relevés pédologiques (Annexe 1). Les distances aux jardins de particuliers semblent être redondantes avec la surface, le périmètre et la pente moyenne des parcelles mais expliquent une faible part de la variance dans les deux premières dimensions. Les pluviométries minimales en années sèches et humides (q20 et q80) paraissent redondantes avec la pluviométrie annuelle médiane comme les températures annuelles minimales, moyennes et maximales le sont entre elles.

Ces redondances sont testées par des corrélations entre les variables quantitatives. Les variables décrivant les températures sont fortement corrélées entre elles (larges cercles bleus Fig.3) (R > 0,9). La médiane de la température maximale est la variable contribuant le plus à la dimension 1, c'est donc celle qui a été conservée pour la suite de cette étude (Annexe 2).

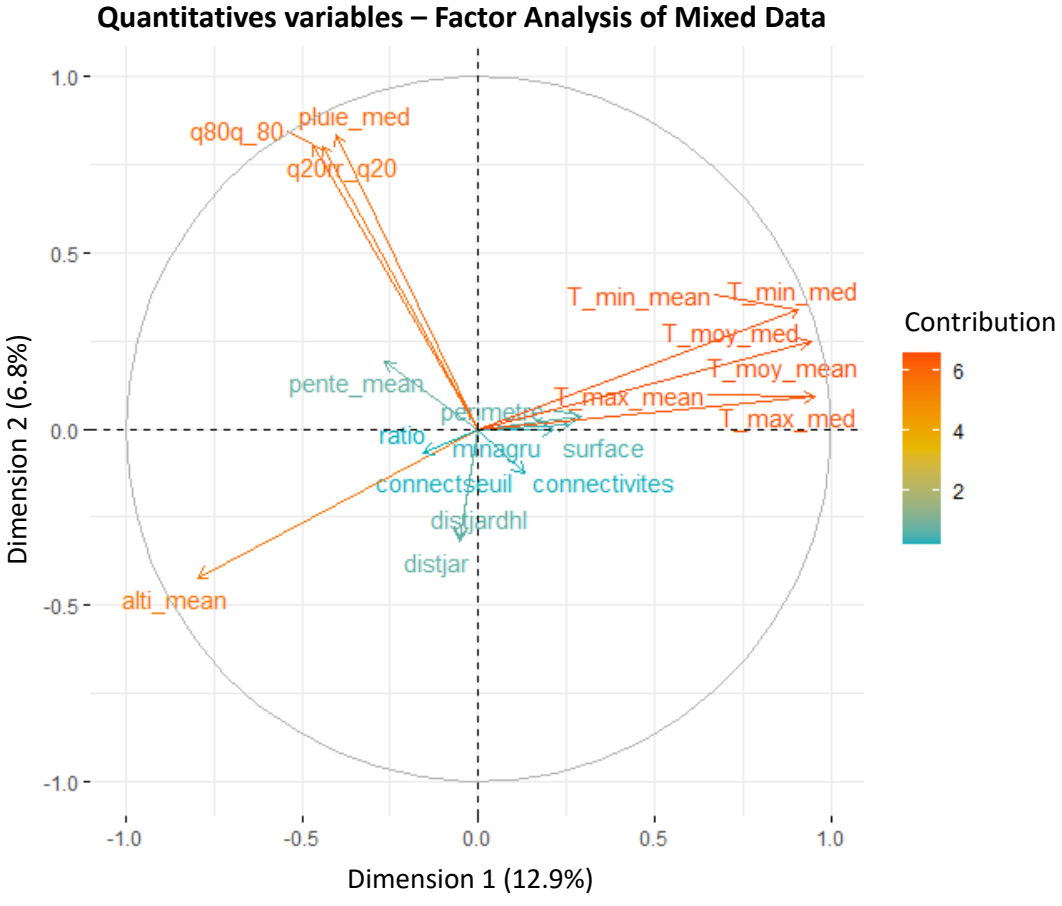


Figure 2 : Cercle des corrélations sur les deux premières dimensions de la FAMD pour les variables quantitatives. Les couleurs chaudes indiquent la plus grande contribution. Les abréviations des variables sont expliquées en Annexe 3.

Les quantités de pluies médianes et les bilans climatiques sont aussi corrélées significativement (R > 0,95). Seules les pluviométries seront gardées car elles ne comportent pas de données manquantes contrairement aux bilans climatiques. Une corrélation positive existe aussi entre les distances entre jardins de particuliers infectés ou non, et entre les connectivités avec seuil ou non (Fig.3. L'altitude moyenne est corrélée négativement aux mesures de températures mais pas aussi significativement que les précédentes ($R < 0,9$), c'est pourquoi l'altitude moyenne a été conservée pour les analyses.

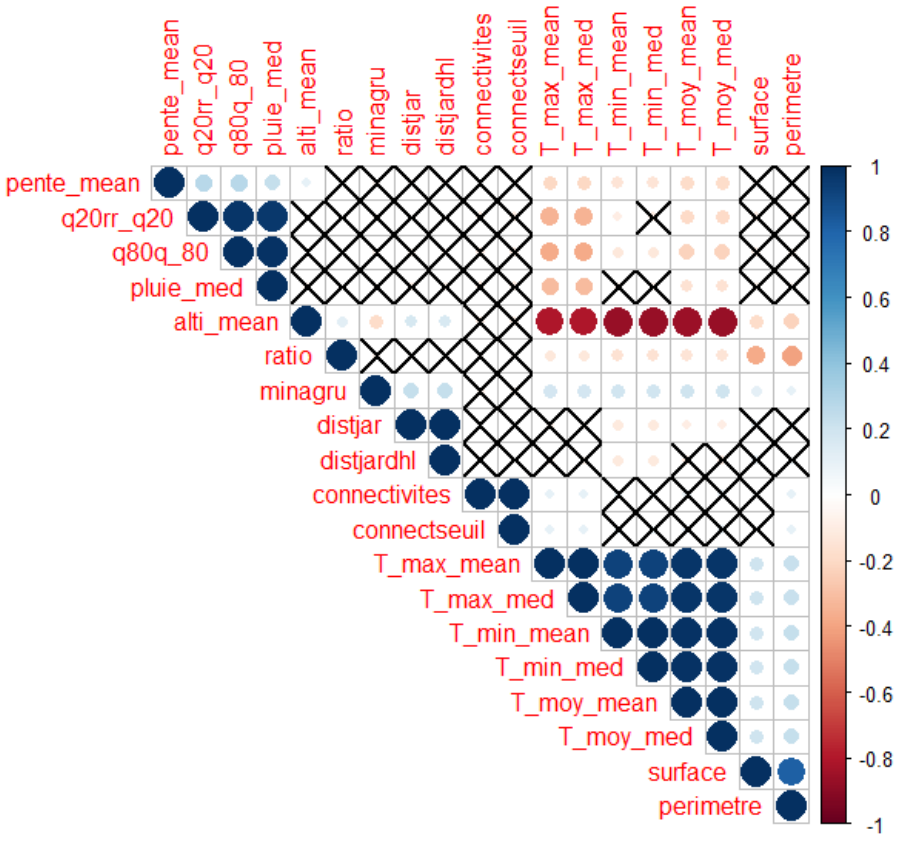


Figure 3 : Corrélogramme des variables quantitatives associées aux vergers d'agrumes. Les croix indiquent l'absence de corrélations, alors que les larges cercles bleus et rouges représentent respectivement une corrélation significative positive et négative. L'intensité de la couleur et la taille des cercles sont proportionnelles aux coefficients de corrélation. La signification des noms de variables est donnée en Annexe 3.

Les modèles d'influence spatiale des différentes occupations du sol ont montré des rayons d'influence maximale de l'ordre de quelques kilomètres. Les modèles les mieux classés sont ceux de la canne à sucre et de l'arboriculture pour des rayons d'influence respectifs de 1,7 km et 4,3 km (Tab.1).

Tableau 1 : Rayon d'influence maximale des différentes occupations du sol et les critères d'information d'Akaike de chaque modèle (AIC).

Type d'occupation du sol	**Rayon (mètres)**	**AIC**
Arboriculture	4313	395.8
Canne à sucre	1688	388.6
Cultures sous serre	5990	433.1
Eau	2295	435.2
Surfaces artificialisées	3702	433.4
Surfaces boisées	2504	436.8
Landes	5948	411.5
Maraichage	3498	431.5
Ombre due au relief	3160	435.8
Pâturages	1284	435.5
Roches et sols nus	2176	432.1

3.2. Liens entre présence/absence de la maladie et des variables du parcellaire

Les modèles linéaires généralisés révèlent un lien entre altitude moyenne et présence du HLB. Une première sélection de modèles avec un prédicateur en plus indiquent l'influence significative de la distance au plus proche jardin de particulier contenant au moins un agrume infecté au HLB (Tab.2 première partie).

La deuxième sélection séquentielle de modèles effectuée met en avant la médiane des températures maximales annuelles comme influence significative de la présence de HLB. Nous notons également une influence significative de la pluviométrie médiane. Les modèles le plus performants ensuite sont ceux qui prennent en compte la distance à la plus proche parcelle d'agrumes et le ratio périmètre par surface de parcelle. Enfin, le modèle le plus informatif prend en compte ces variables mais aussi la connectivité des parcelles lorsque celle-ci est répartie en deux classes, avec notamment un lien significatif entre les parcelles fortement connectées et la présence de HLB (Tab.2 deuxième partie).

Tableau 2 : Classement des modèles linéaires généralisés en fonction de l'AIC. Connectivité en classes faible et sépare les variables de connectivité en deux classes avec comme valeur séparatrice le point d'inflexion du pourcentage d'infectés en fonction de la connectivité. Les astérisques représentent le niveau de significativité avec P-value inférieure à 0,05, à 0,01 et à 0,001 pour respectivement une, deux et trois étoiles.

Modèles	**P-values**	**AIC**
Altitude (Alt)	1,36E-12***	355,13
Alt * Distance au plus proche jardin particulier infecté	alti_mean = 7,57E-11 *** distjardhl = 1,47E-05 *** alti_mean:distjardhl = 0,000212 ***	335,99
Médiane des températures maximales annuelles (Tmax)	4,28E-11 ***	369,34
Tmax * Pluviométrie annuelle médiane (Plu)	T_max_med:pluie_med = 0,0483 *	358,16
Tmax * Plu * Distance à la plus proche parcelle d'agrumes (Agr)	pluie_med = 0,00873 ** T_max_med:pluie_med = 0,00537 **	349,74
Tmax * Plu * Agr * Ratio périmètre sur surface (P/S)	pluie_med = 0,0375 * T_max_med:pluie_med = 0,0252 *	348,62
Tmax * Plu * Agr * P/S * Connectivité en classes faible et forte	Classe_forte_connect = 0,001891 **	330,73

Seules les connectivités issues de la dispersion courte distance (θ = 0,1) sont présentées ici car les connectivités issues de la dispersion longue distance (θ = 8E-4), en classes ou non, donnent des modèles sans lien significatif entre la variable explicatives et la présence de HLB.

3.3. Prédiction du statut sanitaire des parcelles d'agrumes

Sur les 22 variables explicatives du statut des 345 vergers d'agrumes échantillonnés, les cinq plus importantes dans le modèle SVM sont les densités en surfaces artificialisées, en canne à sucre et en maraîchage, les températures maximales médianes et les altitudes moyennes (Fig.4). Bien que l'ordre d'importance de ces variables varie entre chaque sous-validation de la validation croisée, elles restent dans les premières contributrices. Ces prédicteurs ont permis d'estimer le statut sanitaire des 437 vergers d'agrumes non échantillonnés avec une justesse, c'est-à-dire un quotient des vrais positifs et négatifs sur l'ensemble des estimations de 0,8. L'ensemble des parcelles positives au HLB, observées et estimées, sont au nombre de 192 et celles négatives 590. Le modèle prédit mieux les statuts positifs (sensibilité = 0,82) que les statuts négatifs (spécificité = 0,72).

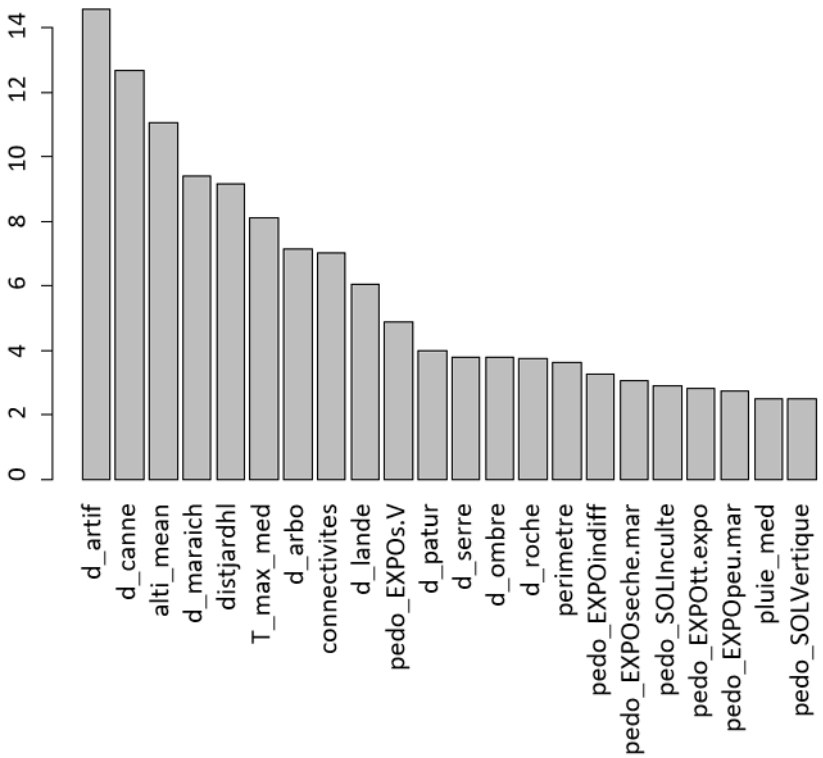


Figure 4 : Contributions respectives des variables dans l'apprentissage de l'algorithme SVM expliquant le statut sanitaire des parcelles. La signification des noms de variables est donnée en Annexe 3.

Les variables prédictives du statut sanitaire avec le modèle RF sont les altitudes moyennes, les températures maximales médianes et les densités d'arboriculture, de landes et de cultures de canne à sucre dans leur rayon optimal d'influence (Fig.5). Les statuts positifs observés et estimés sont au nombre de 202 avec une sensibilité de 0,82, alors que 580 sont classés négatifs mais la spécificité est moins grande (0,65). La justesse globale du modèle après validation croisée est inférieure à celle issue du modèle SVM (0,78).

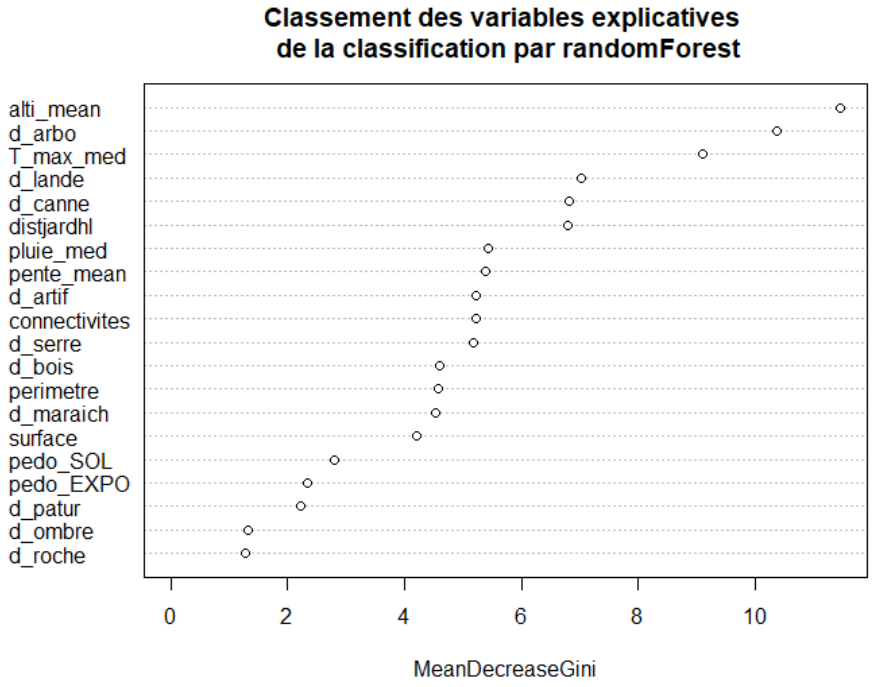


Figure 5 : Contributions respectives des variables dans l'apprentissage de l'algorithme RF expliquant le statut sanitaire des parcelles. La signification des noms de variables est donnée en Annexe 3.

3.4. Inférence du risque à l'échelle du territoire

A partir des statuts sanitaires observés et prédit par SVM, les calculs du risque ont été conduits en fonction des paramètres R_0 et θ. La somme des différences *D* entre risque estimé et risque observé, ici le statut sanitaire précédemment obtenu, est établie afin d'en trouver le minimum. La recherche de minimum pour la fonction de calcul de *D* donne une valeur de 98,67 correspondant à une valeur de θ de 1,14 et de R_0 de 202. Puis le risque w_i est estimé pour chaque verger d'agrumes avec ces valeurs. Sur les 782 parcelles, 100 avaient un risque de présence de la maladie de 1, 616 avaient un risque nul et pour 66 le risque était compris entre 0 et 1.

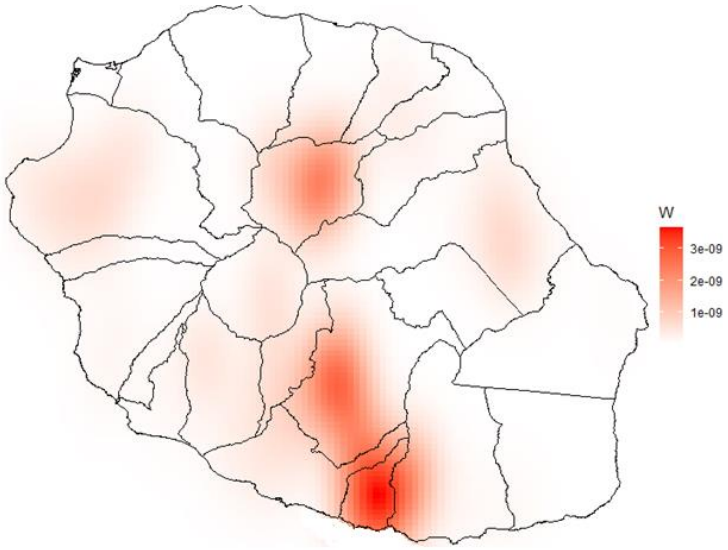


Figure 6 : Cartographie du risque estimé de présence du HLB à la Réunion. Le rouge représente le risque maximal et une zone blanche indique un risque minimal.

Le risque est enfin projeté sur l'ensemble du territoire réunionnais par krigeage (Fig.6). La zone à risque la plus importante est celle au sud de l'île formée par les communes de Petite-île, de Saint-Pierre et du Tampon, le principal bassin de production d'agrumes à la Réunion. Une zone à risque est également présente dans le cirque de Salazie. Le reste des communes présentent un risque faible à l'exception de Sainte-Rose et Saint-Philippe (zone du volcan) qui ont un risque estimé nul.

4. Discussion

Dans cette partie, nous allons rappeler les variables éco-climatiques qui expliquent le mieux la présence du HLB à la Réunion en lien avec la biologie de la maladie. Nous discuterons les valeurs de paramètres de dispersion et de taux de reproduction. Puis nous verrons comment le risque estimé peut servir à la surveillance du paysage.

La variable la plus reliée au risque de contamination au HLB est de loin l'altitude, et ce, quelle que soit la méthode utilisée. Les deux espèces de psylles reconnues comme vecteurs du HLB, *D. citri* et *T. erytreae*, possèdent des niches écologiques légèrement différentes. Alors que *T. erytreae* s'adapte à des hautes altitudes (Aubert, 1989), *D. citri* sera majoritairement cantonné aux basses et moyennes altitudes (Aubert, 1989), restant surtout en périphérie de l'île. A la Réunion, l'épidémie de HLB en cours est vectée essentiellement par les populations de *D.citri*, la présence de *T. erytreae* étant anecdotique (quelques individus, Bernard Reynaud, comm. pers.). C'est donc sans doute la biologie du supposé principal vecteur à la Réunion qui explique le fort lien entre altitude et présence/absence de la maladie. De plus si la température joue un rôle également dans la structuration spatiale de la présence de HLB, c'est qu'elle est inversement corrélée à l'altitude. La température est elle aussi reconnue comme influente sur le comportement de vol des vecteurs (Hussain *et al*., 2016). L'ensemble altitude/température exerce une force structurante dans les populations de vecteurs et donc sur la maladie.

Une fois la variance due à l'altitude/température expliquée, l'influence de la connectivité des parcelles est notable. La probabilité d'infection des parcelles fortement connectées est plus forte que celle des parcelles faiblement connectées. Cela rejoint les résultats de simulations du chapitre 2A, montrant que la structuration du parcellaire a bien un impact sur les chemins épidémiologiques et que la maladie peut circuler dans des poches de connectivité. Même si elles ont sans doute un rôle majeur, les parcelles très connectées ne sont probablement pas les seules à contribuer à la propagation épidémique puisqu'il existe un lien significatif entre le statut sanitaire d'une parcelle et la distance au plus proche jardin particulier infecté. Il est donc possible que les jardins de particuliers avec des agrumes soient eux aussi des points de passage de la maladie et soient susceptibles de relier des poches de connectivités entre elles. La surveillance de la maladie pourrait être alors plus efficace en ciblant les parcelles de fortes connectivités et les jardins des particuliers. Alternativement les jardins des particuliers pourraient avoir une influence négligeable sur la propagation épidémique mais être plus souvent infectés lorsqu'ils sont à proximité d'une parcelle connectée. Trancher entre ces hypothèses nécessiterait d'analyser la diversité génétique des bactéries responsables du HLB et retracer les relations de parenté entre les souches des jardins et celles des parcelles.

De plus, les algorithmes d'apprentissage montrent également une corrélation entre les cultures aux alentours des parcelles d'agrumes dans la présence de la maladie, notamment des cultures arboricoles et de cannes à sucre. Dans les catégories d'utilisation des sols, les cultures arboricoles comprennent aussi les cultures d'agrumes, ce qui peut expliquer la relation avec la maladie. La présence potentielle du HLB est renforcée dans les zones de cultures d'agrumes ou similaires. L'effet positif de la canne à sucre est moins évident, la canne à sucre étant non hôte pour la bactérie comme pour les psylles. Il pourrait être dû à l'impact de ces cultures sur les psylles vecteurs, du fait de l'impact chimique dû aux intrants sur ces cultures qui pourrait limiter la compétition avec d'autres insectes occupant des niches écologiques proches.

A partir de deux valeurs de paramètre de dispersion testées, représentant la dispersion longue et courte distance, la valeur inférée du paramètre correspond à une dispersion moyenne de 1,75 mètre, soit une dispersion à très courte distance. Cette valeur de dispersion serait plus attendue sur des données de dissémination intra-parcellaire. Si ce noyau de dispersion reflète la réalité, la dispersion inter-parcellaire ne peut alors qu'avoir lieu par des contaminations de proches en proches ou par des phénomènes de dissémination longue distance rares (type déplacement humain de matériel végétal infecté). La dissémination de proche en proche serait cohérente avec un possible rôle des jardins qui resserreraient le maillage dans le réseau d'hôtes jusqu'à rendre possible une propagation avec une dispersion aussi courte. Le taux reproduction estimé est très fortement supérieur à ce qui est trouvé dans la littérature (Gao *et al*., 2018). Cela s'explique par le fait que, contrairement au cadre général de Parnell et al. (2014), nous avons dans cette étude calculé R_0 globalement et non pas individuellement pour toutes les localisations d'hôtes. Ainsi la valeur du taux de reproduction à 202 exprime le fait qu'en dans le cas d'une dispersion homogène à partir d'une parcelle *i* infectée, la charge épidémiologique pourrait permettre l'infection de 202 nouvelles localisations dans le parcellaire. Les parcelles non contaminées dans les très fortes zones à risque estimées seraient donc très susceptibles de recevoir la maladie. En tout état de cause, ces estimations n'étant pas dérivées d'un modèle épidémiologique exploitant des données temporelles, elles sont à prendre avec beaucoup de précaution, comme une première estimation de ce que peut être une épidémie de HLB à la Réunion.

Suite à cette première estimation du risque et aux travaux de simulation du chapitre 2A, les recommandations pour la surveillance seraient d'orienter l'échantillonnage vers les jardins et les parcelles faisant potentiellement la liaison entre deux poches de connectivités (aux Avirons ou à Etang Salé, ainsi qu'à l'entrée du cirque de Salazie). Au sein des poches de connectivités, les parcelles d'agrumes fortement connectées seraient à surveiller en priorité. Il s'agit d'un effort déjà commencé à la Réunion, avec un échantillonnage de 100 parcelles par an, dont 50 sont les parcelles à forte connectivité. L'application de cette stratégie basée sur le risque impliquerait cependant de contrôler

des particuliers et des agrumiculteurs clés plusieurs fois par campagne. Une telle stratégie nécessiterait probablement des travaux en amont sur la manière d'atteindre une bonne acceptabilité des mesures de surveillance.

5. Références

Anses, 2021. ANSES_LSV_MA063_V2. https://www.anses.fr/en/system/files/ANSES_LSV_MA063_V2.pdf

Aubert, B., 1988. Le greening, une maladie infectieuse des agrumes, d'origine bactérienne, transmise par des homoptères psyllidés : contribution à l'étude d'une stratégie de lutte appliquée au cas de l'île de la Réunion (thesis). CIRAD-IRFA, s.l.

Avon, C., Bergès, L., 2013. Outils pour l'analyse de la connectivité des habitats. Rapport 1.

Bové, J.M., Garnier, M., 1984. Citrus Greening and Psylla Vectors of the Disease in the Arabian Peninsula. International Organization of Citrus Virologists Conference Proceedings (1957-2010) 9. https://doi.org/10.5070/C547K0S54Z

Breiman, L., 2001. Random Forests. Machine Learning 45, 5–32.

Carpentier, F., Martin O., 2021. Package Siland. Method to estimate the spatial influence scales of landscape variables on a response variable.

Deflem, M., 1997. Surveillance and Criminal Statistics: Historical Foundations of Governmentality. Studies in Law Politics and Society 17, 149–184.

Dupuy, S., Gaetano, R., 2019. La Réunion - Carte d'occupation du sol, 2017 (Spot6/7).

Enderlein, G., 1987. McCullagh, P., J. A. Nelder: Generalized linear models. Chapman and Hall London – New York 1983, 261 S., £ 16,–. Biometrical Journal 29, 206–206. https://doi.org/10.1002/bimj.4710290217

Gao, S., Luo, L., Yan, S., Meng, X., 2018. Dynamical Behavior of a Novel Impulsive Switching Model for HLB with Seasonal Fluctuations [WWW Document]. Complexity. https://doi.org/10.1155/2018/2953623

Gilligan, C.A., 2008. Sustainable agriculture and plant diseases: an epidemiological perspective. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences 363, 741–759. https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2181

Helm, J.F., Sandler, R.S., 1999. COLORECTAL CANCER SCREENING. Medical Clinics of North America 83, 1403–1422. https://doi.org/10.1016/S0025-7125(05)70172-3

Hussain, M., Bano, S., Qasim, M., Gao, J., Arthurs, S.P., Wang, L., Qiu, D., Mao, R., 2022. Association between Temperature and Reproductive Fitness of Diaphorina citri Infected with *Candidatus* Liberibacter Asiaticus. Agronomy 12, 815. https://doi.org/10.3390/agronomy12040815

Last, J.M., 2001. RE: "A DICTIONARY OF EPIDEMIOLOGY, FOURTH EDITION, EDITED BY JOHN M. LAST, ROBERT A. SPASOFF, AND SUSAN G. HARRIS." American Journal of Epidemiology 154, 389–389. https://doi.org/10.1093/aje/154.4.389

Liu, Y.H., Tsai, J.H., 2000. Effects of temperature on biology and life table parameters of the Asian citrus psyllid, Diaphorina citri Kuwayama (Homoptera: Psyllidae). Annals of Applied Biology 137, 201–206. https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2000.tb00060.x

Lush, T., Press, T.A., 2014. $31.5 million in federal funds allocated for fight against citrus greening - Canadian Business. Canadian Business - Your Source For Business News. URL https://archive.canadianbusiness.com/business-news/31-5-million-in-federal-funds-allocated-for-fight-against-citrus-greening/ (accessed 3.29.22).

Martinetti, D., Soubeyrand, S., 2018. Identifying Lookouts for Epidemio-Surveillance: Application to the Emergence of Xylella fastidiosa in France. Phytopathology 109, 265–276. https://doi.org/10.1094/PHYTO-07-18-0237-FI

Martinez, A., n.d. 2007 Georgia Plant Disease Loss Estimates 24.

Martini, X., Hoyte, A., Stelinski, L.L., 2014. Abdominal Color of the Asian Citrus Psyllid (Hemiptera: Liviidae) is Associated with Flight Capabilities. Annals of the Entomological Society of America 107, 842–847. https://doi.org/10.1603/AN14028

McCullagh, P., Nelder, J.A., 2019. Generalized Linear Models, 2nd ed. Routledge, New York. https://doi.org/10.1201/9780203753736

Melot, C., 2021. Prévalence de la maladie du Huanglongbing des agrumes dans les jardins réunionnais et caractérisation moléculaire de la bactérie responsable, *Candidatus* Liberibacter asiaticus. Encadrement : Olivier PRUVOST, Virginie RAVIGNÉ, Ismaël HOUILLON, Karine BOYER.

Meyer, D., 2020. Support Vector Machines. The Interface to libsvm in package e1071.

Nava, D.E., Torres, M.L.G., Rodrigues, M.D.L., Bento, J.M.S., Parra, J.R.P., 2007. Biology of Diaphorina citri (Hem., Psyllidae) on different hosts and at different temperatures. Journal of Applied Entomology 131, 709–715. https://doi.org/10.1111/j.1439-0418.2007.01230.x

Norström, M., Skjerve, E., Jarp, J., 2000. Risk factors for epidemic respiratory disease in Norwegian cattle herds. Preventive Veterinary Medicine 44, 87–96. https://doi.org/10.1016/S0167-5877(99)00113-0

Pagès, J., 2004. Analyse factorielle de données mixtes. undefined.

Parnell, S., Gottwald, T.R., Riley, T., Bosch, F. van den, 2014. A generic risk-based surveying method for invading plant pathogens. Ecological Applications 24, 779–790. https://doi.org/10.1890/13-0704.1

Parry, M., Gibson, G.J., Parnell, S., Gottwald, T.R., Irey, M.S., Gast, T.C., Gilligan, C.A., 2014. Bayesian inference for an emerging arboreal epidemic in the presence of control. Proceedings of the National Academy of Sciences 111, 6258–6262. https://doi.org/10.1073/pnas.1310997111

Raunet, M., 1991. Le milieu physique et les sols de l'Ile de la Réunion. Conséquences pour la mise en valeur agricole. undefined.

Saura, S., Pascual-Hortal, L., 2007. A new habitat availability index to integrate connectivity in landscape conservation planning: Comparison with existing indices and application to a case study. Landscape and Urban Planning 83, 91–103. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2007.03.005

Sechler, A., Schuenzel, E.L., Cooke, P., Donnua, S., Thaveechai, N., Postnikova, E., Stone, A.L., Schneider, W.L., Damsteegt, V.D., Schaad, N.W., 2009. Cultivation of '*Candidatus* Liberibacter asiaticus', 'Ca. L. africanus', and 'Ca. L. americanus' Associated with Huanglongbing. Phytopathology® 99, 480–486. https://doi.org/10.1094/PHYTO-99-5-0480

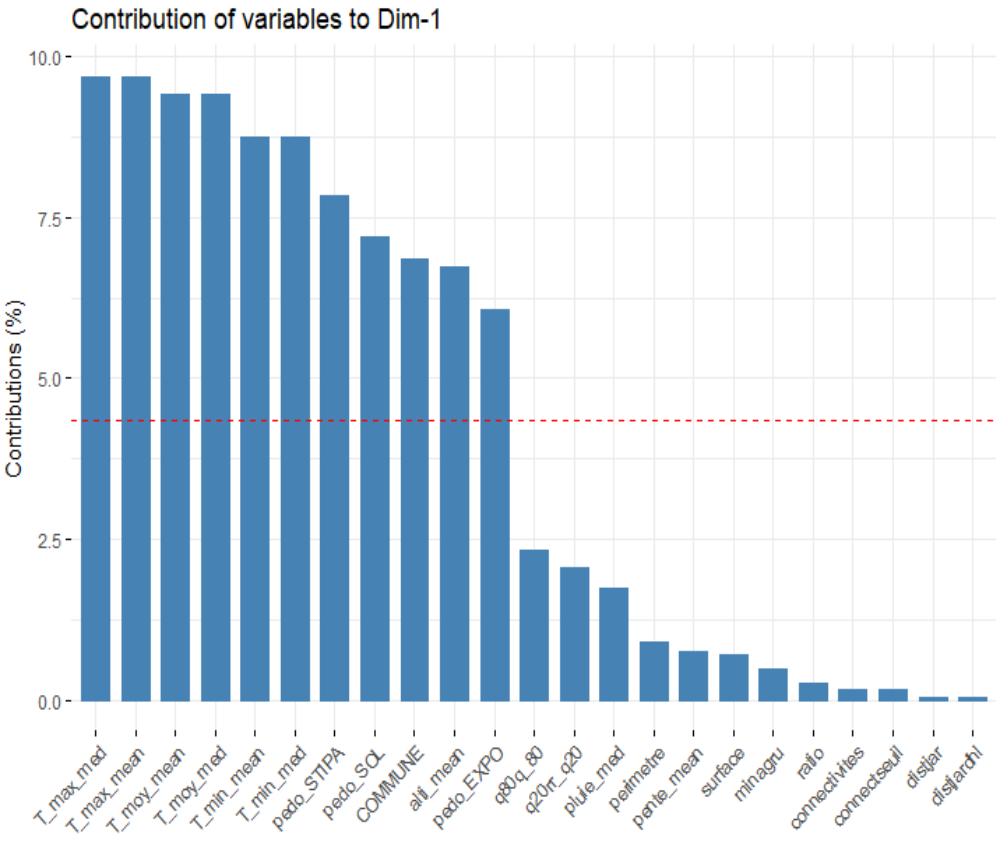
Strange, R.N., Scott, P.R., 2005. Plant Disease: A Threat to Global Food Security. Annual Review of Phytopathology 43, 83–116. https://doi.org/10.1146/annurev.phyto.43.113004.133839

Tomaseto, A.F., Krugner, R., Lopes, J.R.S., 2016. Effect of plant barriers and citrus leaf age on dispersal of Diaphorina citri (Hemiptera: Liviidae). Journal of Applied Entomology 140, 91–102. https://doi.org/10.1111/jen.12249

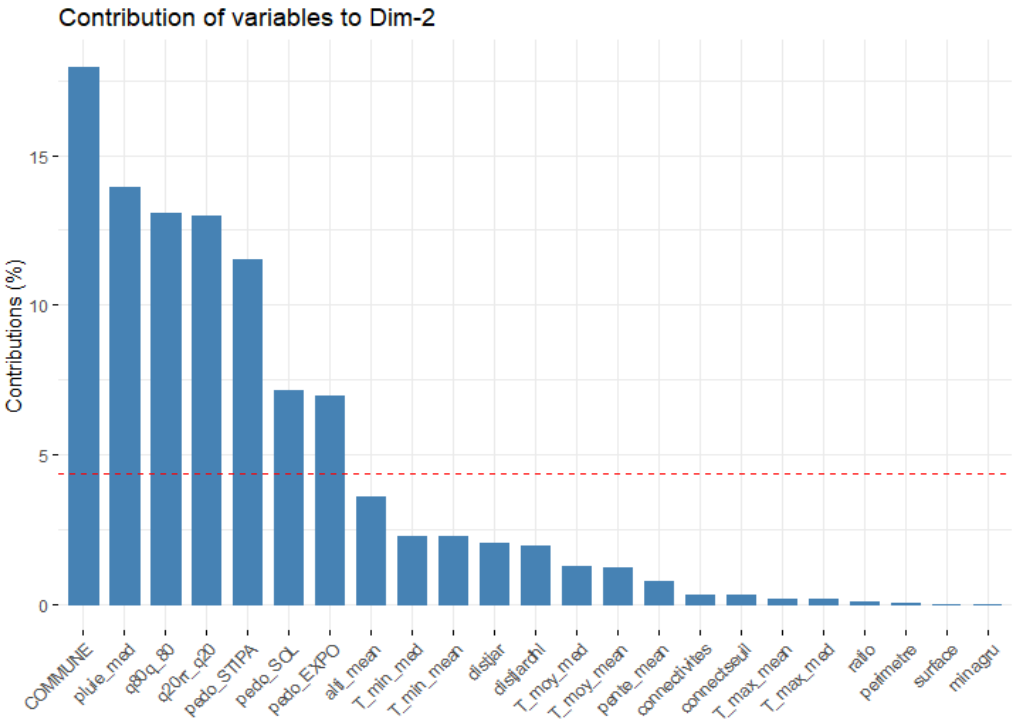
Wei, T., Simko, V., 2021. An introduction to corrplot package.

6. Annexes

Annexe 1 : Contribution de chaque variable à la dimension 1 de la FAMD en pourcentage.



Annexe 2 : Contribution de chaque variable à la dimension 2 de la FAMD en pourcentage.



Annexe 3 : Correspondance entre les noms de variables et ce qu'elles représentent.

Nom	Signification
d_artif	Densité de surfaces artificialisées dans le rayon optimal calculé avec SILAND.
d_canne	Densité de surfaces de cultures de canne à sucre dans le rayon optimal calculé avec SILAND.
d_maraich	Densité de surfaces de maraichage dans le rayon optimal calculé avec SILAND.
alti_mean	Altitude moyenne d'un relevé ou du centroïde d'une parcelle.
distjardhlb	Distance au plus proche jardin infecté parmi ceux échantillonnés.
T_max_med	Médiane des températures maximales annuelles. (Même système de notation pour les températures moyennes (moy) et minimales (min) ainsi que la moyenne (mean) de ces températures).
d_arbo	Densité de surfaces d'arboriculture dans le rayon optimal calculé avec SILAND.
d_lande	Densité de surfaces de landes dans le rayon optimal calculé avec SILAND.
pedo_EXPOs.V	Zone sous le vent.
d_patur	Densité de surfaces de pâturage dans le rayon optimal calculé avec SILAND.
d_serre	Densité de surfaces de cultures sous serre dans le rayon optimal calculé avec SILAND.
d_ombre	Densité de surfaces dans l'ombre de relief comme les remparts des cirques dans le rayon optimal calculé avec SILAND.
d_roche	Densité de surfaces couvertes de roches dans le rayon optimal calculé avec SILAND.
pedo_EXPOindiff	Zone d'exposition indifférenciée aux vents.
pedo_SOLInculte	Zone pédologique non définie.
pedo_EXPOseche.mar	Zone des cirques avec une saison sèche marquée
pedo_EXPOtt.expo	Zone de toutes les expositions aux vents.
pedo_EXPOpeu.mar	Zone des cirques avec une saison sèche peu marquée
pluie_med	Médiane de la quantité de pluies annuelles.
pedo_SOLVertique	Zone de sols vertiques.

q80_q80	Pluviométrie minimales en années humides.
q20rr_q20	Pluviométrie minimales en années sèches.
minagru	Distance à la plus proche parcelle d'agrumes.
pente_mean	Pente moyenne.
dist_jar	Distance au plus proche jardin parmi ceux échantillonnés.
connectseuil	Connectivités avec un seuil à 0.1 en dessous duquel les connectivités sont considérées égales à 0 par éviter les très faibles valeurs.

Avant-propos 3

Dans le chapitre qui suit sera présentée la mise en application de la méthode OASIS au système de surveillance du HLB à la Réunion. Développée par un groupe de travail de l'Anses, cette méthode a été conçue pour les systèmes de surveillance des maladies animales. Cependant, l'applicabilité à la surveillance en santé du végétale commence à se développer, et c'est sous l'impulsion de l'ancien chef de l'unité RAPT Anses Réunion, Bruno Hostachy, qu'une évaluation OASIS a été intégrée à ma thèse. Cette étude est dans les premières en santé végétale et la première à se pencher sur un système de surveillance dans les DROMs.

Cette évaluation a fait l'objet d'un rapport de stage d'ingénieur et sera remis aux commanditaires de l'évaluation sous la forme d'un rapport officiel courant 2022. Ici nous présenterons ces mêmes travaux au format article scientifique. Si les conclusions de ce chapitre révèleront certainement les mêmes tendances que le rapport officiel, il est nécessaire de rappeler que le processus de finalisation de la grille de notation n'est pas terminé.

CHAPITRE 3 : L'évaluation OASIS du réseau de surveillance du HLB à la Réunion

OASIS evaluation of the surveillance network of Huanglongbing on citrus in Réunion Island: brave moves of a small system

Ismaël Houillon[1, 2, 3, 4], Aurélien Flon-Rebours[5], Aude Chabirand[4], Camille Demassieux[6], Anne Quillévéré[3], Virginie Ravigné[7,8]

[1] CIRAD, UMR PVBMT, 97410, Saint Pierre, La Réunion

[2] BioSP, INRAE, 84914, Avignon, France

[3] Unité Epidémiologie et Appui à la Surveillance, Laboratoire de Lyon, ANSES, 69007 Lyon, France

[4] Unité des Ravageurs et agents pathogènes tropicaux, Laboratoire de la santé des végétaux, ANSES, 97410, Saint Pierre, La Réunion

[5] CIRAD, UMR Innovation, F-34398 Montpellier, France

[6] DAAF Saint-Pierre, La Réunion, France

[7] CIRAD, UMR PHIM, F-34398 Montpellier, France.

[8] PHIM, Univ Montpellier, CIRAD, INRAE, Institut Agro, IRD, Montpellier, France.

Corresponding author: virginie.ravigne@cirad.fr

Keywords

Plant epidemiology, Surveillance, Citrus greening, HLB, Evaluation of surveillance

Abstract

Huanglongbing is the most devastating disease of citrus worldwide. A disease caused by bacteria of the genus *Candidatus* Liberibacter and transmitted by psyllids vectors *Diaphorina citri*, it presents long asymptotic phases and then non-specific symptoms. This complexity makes HLB particularly challenging to organize and succed surveillance. To do this, analyze the surveillance network for such a disease in order to identify the strengths and weaknesses as well as areas for improvement. The OASIS method was developed for the evaluation of surveillance systems, based on a series of interviews to assign scores in consultation with the network actors. Initially in animal health, this study is among the first to demonstrate its applicability in plant health. We used this tool to conduct an evaluation of the HLB surveillance system in Réunion. The small size of the surveillance system has allowed for an exhaustiveness that is very difficult to expect, especially in larger systems such as those in metropolitan France. The core of the surveillance is quite well ensured, especially on the collection of data and their analysis in the laboratory. However, the management of downstream data is still being improved to be able to value the work of the device. Internal and external communication are areas for improvement. The small size of the system is characterized by many informal exchanges between actors that should be more explicitly formalized when it comes to the general objectives of the network. External communication with the general public and producers could increase the acceptance of management measures by uprooting.

1. Introduction

Huanglongbing or citrus greening (hereafter HLB) is considered as the most devastating disease of citrus worldwide (Gottwald, 2010). HLB is caused by Gram-negative bacteria of the genus *Candidatus* Liberibacter, transmitted by at least two psyllid vectors *Diaphorina citri* and *Trioza erytreae*. HLB is responsible for dramatic economic losses for all contaminated citrus growing regions. These losses were estimated at approximately US$1 billion per year for the last five years in Florida (Li *et al*., 2020), and to several tens of millions of US$ in citrus growing Brazil states (Oliveira *et al*. 2013; Costa *et al*. 2021). Economic losses are both due to direct damages (such as early fruit ripening, fruit shape and color alteration, bitter flavor, branch desiccation and tree death) and indirect costs associated with quarantine rules and management strategies. In the absence of efficient curative treatments, the identification and removal of infected trees is a mainstay of disease management. Most commercial citrus species and varieties are susceptible to the disease and most citrus growing regions have been contaminated, but the Mediterranean region. In the European Union, causal bacteria and both vectors are regulated as union quarantine pests and listed as priority pests, implying the obligation for annual surveys (Regulation (UE) 2016/2031: Appendix II, Part A, Chapter 1 of the directive n°2000/29/CE).

The surveillance of HLB is particularly challenging. Disease transmission is mediated by insects, which may use host plants in the environment surrounding citrus groves such as orange jasmin (*Murraya paniculata*) (Teck *et al*., 2011). Insect population dynamics may therefore produce complex transmission patterns (Pelz-Stelinski *et al*., 2017). Disease progression in a tree is fast - the latency period is only 15 days (Lee *et al*., 2015) - but mostly asymptomatic during months to years (Irey *et al*., 2006). When foliar symptoms finally appear, they can easily be misinterpreted as nutrient deficiencies or infections by other pathogens such as Tristeza virus. Asymmetrical fruits are more distinctive but appear late. Symptomatology also varies greatly between citrus species and varieties. As a consequence, reliable detection currently stems on molecular tools. In the EU, the official detection method is real-time PCR (DGAL/SDSPV/2021-807, 2021; ANSES/LSV/MA063, 2021). While efficient, this method imposes a significant cost on surveillance systems. Because of this combination of biological and technical features, there has been several studies aiming at optimizing the surveillance of HLB (Parnell *et al*., 2014; Cunniffe *et al*., 2014), all of which show that any lack of efficiency in the application of surveillance strategies may have dramatic consequences on citrus production.

In 2015, Réunion, a small French oversea region (2512 km^2) in South West Indian Ocean, reported the presence of HLB. Locally, citrus production is ensured by approx. 600 growers, on 296 hectares of small orchards, scattered in a both fragmented and ecologically heterogeneous landscape (Houillon *et al*., submitted in 2022, chapitre 2A). Citrus is mainly targeted for local consumption and transformation

due to quarantine regulation rules. Only 10% growers are affiliated to a cooperative or a producer association (Dupré *et al*. 2017). Yet, citrus production bears a patrimonial value, with varieties considered as emblematic of the island (e.g., kaffir lime, tangors). After suffering from a first epidemic in the 80's, Réunion had long been one of the very few (if not the only) place where HLB was considered as eradicated (Aubert *et al*., 1996). So in 2015, it was initially not clear, which bacteria and vectors were implicated, and whether it was a novel introduction or local reemergence of the old epidemic.

Upon the discovery of HLB infected trees, Réunion fell under the same legislation as continental France, and surveillance of HLB was mandatory. Due to geographic isolation, local state services had to set up an operational surveillance system relying on a very small number of actors. In 2019, EU legislation changed and ultraperipheral regions such as Réunion had to establish their own regulation of plant diseases. HLB surveillance therefore continued in a relative absence of firm rules and under low financial support, a situation common in other ultraperipheral regions of EU and many other countries.

In this context, we proposed to evaluate this surveillance system. Evaluations are essential to improve system design, and the interpretation of outputs, as well as to promote objective decision-making and acceptance of system outputs by stakeholders (Peyre *et al*., 2019). In addition, evaluations can prove useful to other systems operating in different regions, as well as for the setup of new surveillance systems, through the identification of success and failure factors. Up to now, most evaluation of French surveillance systems have dealt with large systems deployed in continental France, *e.g*., OASIS REPHYTOX, an evalutation of the surveillance system of shellfish production areas (Demande n°2018-SA-0221 « OASIS REPHYTOX », 2018). The present evaluation is thus a very good opportunity to expand the range of the studied surveillance systems and offer an insight into small surveillance systems.

2. Materials and methods

2.1. The HLB surveillance network of Réunion

In Réunion, the HLB surveillance network performs active surveillance in citrus orchards and nurseries. It has a steering committee (CROPSAV, Conseil Régional d'Orientation de la Politique Sanitaire Animale et Végétale) composed of representatives of national and regional authorities, public stakeholders in charge of agriculture and private professional organizations, who gather twice a year to endorse decisions as to surveillance and also disease management. The network is coordinated by a local representative of the French Ministry of Agriculture (DAAF, Direction de l'Alimentation de l'Agriculture et de la Forêt) under the supervision of their national counterpart (DGAL, Direction

Générale de l'Alimentation). DAAF plans surveillance and delegates sampling to FDGDON (Fédération Départementale des Groupements de Défense contre les Organismes Nuisibles), an approved private organization, which also performs molecular-based diagnostic using the official method, through their local laboratory branch (La Clinique du Végétal). FDGDON receives supervision and technical support from the local representative of the national French health agency (ANSES, Agence Nationale de Sécurité Sanitaire de l'Alimentation, de l'Environnement et du Travail), which is also the national official reference laboratory for HLB. ANSES is committed to organize and financially support annual proficiency testing and continuous scientific and technical support to approved laboratories on HLB diagnostic. Surveillance is planned with the help of a technical and scientific committee composed of all the previously cited actors of surveillance (DAAF, FDGDON, ANSES, Clinique du Végétal), as well as collaborators including agricultural counselors (Chambre d'Agriculture), researchers from Cirad (Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement) and Armeflhor (Association Réunionnaise pour la Modernisation de l'Economie Fruitière, Légumière et HORticole) and producer organizations. While FDGDON and DAAF reported the data in official databases, the cleansing and real-time analysis of surveillance data was temporarily delegated to Cirad researchers. Apart from DGAL, which is based in continental France, all actors and collaborators were in Réunion during the evaluated period, some of them sharing the same buildings.

From 2015 to 2017, the surveillance network mainly aimed at confirming the resurgence of HLB and gaining a first insight on the geographic extent of the epidemic. At that time, surveillance of HLB targeted 30 orchards a year with 1 to 5 symptomatic trees in each orchard. Upon realizing that HLB was not starting from a restrained introduction point, but was already present in several municipalities in the South and East of the island, the network decided to properly map the presence of HLB in all production areas, identity exempt areas and test for an effect of elevation on disease incidence as suggested by the scientific literature (Bové, 2006). From then surveillance targeted 60 to 100 orchards a year. To minimize the rate of false negative orchards, an innovative sampling protocol was set up with the help of ANSES. Once in an orchard, field technicians sampled 15 leaves by tree on 60 trees by hectare (i.e., generally 30 trees a typical orchard). Tree samples were then pooled by groups of 10 for molecular diagnostic. The choice of orchards to be tested required an intensive effort of cartography of commercial orchards (Houillon *et al*., submitted in 2022, chapitre 2A), which results were obtained progressively between 2017 and 2020 by Cirad researchers. Each year, about half sampled orchards were chosen based on their connectivity as computed by researchers, the other half being chosen so as to explore new production basins. Over five years, the main production basins of the island have been tested with a relatively homogeneous sampling effort (about 36% of known orchards have been

tested once). Between 2018 and 2021, 2123 samples have been taken throughout the territory of Reunion, in 318 citrus orchards.

2.2. Evaluation method

The HLB surveillance network of Réunion was evaluated with the *Outil d'Analyse des Systèmes d'Information en Santé* (OASIS) (Hendrickx *et al*., 2011), which is available on epidemiological surveillance in animal health platform website. This semi-qualitative method enables standardized and comprehensive evaluations of the organization and operations of surveillance systems. Due to its participatory approach with the actors of surveillance, it supports the acceptability of results and the uptake of recommendations. This method is also used as the reference method of the French platform for epidemiological surveillance in animal health (https://www.plateforme-esa.fr), and was being applied to plant epidemiological surveillance for the first time on the French *Xylella fastidiosa* network at the time of the present study. OASIS is based on an evaluation grid composed of 78 criteria marked from zero (lowest possible score) to three (highest possible score), according to a precise scoring guide (available on https://www.plateforme-esa.fr/article/l-outil-d-evaluation-oasis). Due to the usual orientation of the OASIS method towards animal epidemiology and larger surveillance systems, an effort of translation of the method to plant epidemiology and small systems was performed. In addition to scores, evaluators provide precise justifications for attributed scores and recommendations for improvement. OASIS outputs are analyzed through three analysis grids using different weights for each criterion and illustrating (i) 10 functional sections (defined according to the structure and activities of a surveillance system), (ii) seven critical control points which are the operations where improvement measures can be implemented and (iii) 10 attributes, i.e. measurable characteristics such as representativeness or timeliness which indicate the system's quality.

Once the DAAF representative approved the principle of an evaluation of the HLB surveillance network of Réunion using the OASIS tool, a joint team was built, composed of two fully external evaluators (from organizations not involved in the network) and three external evaluators (not personally involved in the network but from one of the network organizations) (Tab.1). One of the evaluators was experienced with the OASIS method, and another evaluator came from veterinary sciences, a key point to successfully translate OASIS to plant surveillance. This team conducted a series of semi-open interviews from 21 April 2021 to 01 July 2021, either face to face or by video conferencing (lasting between 1 and 2.5 h), with a panel of 27 representative partners of the network (Tab.2). Due to the small size of the system, this panel included almost all actors and collaborators of the network as well as some beneficiaries and funding organizations of the surveillance of HLB. Almost all professionals

contacted by the evaluation team agreed to be interviewed. In contrast, contacted citrus growers only agreed to informal exchanges and refused being included in the study. Following interviews, two external evaluators filled the OASIS grid (including commentaries), which was then discussed with the other evaluators. When necessary, information was cross-checked between the notes of the evaluators and some interviewees were contacted again to provide additional information or clarification. Then, the grid was reviewed with a panel composed of 13 of 27 interviewed including five evaluators, members of DAAF, DGAL, Cirad, Anses, Arifel, Chamber of Agriculture and a tree nurseryman, during a full-day meeting on 15 July 2021. At this stage, an additional internal evaluator joined the team to help adapt the score and emit additional comments until a full consensus was reached between all evaluators and with the review panel.

Table 1. External and internal evaluators of the OASIS evaluation of the HLB surveillance network of Réunion.

Name	Position at the time of evaluation	Type of evaluator
Anne QUILLEVERE-HAMARD	Plant epidemiologist at ANSES Lyon, France. Joint coordinator of the French plant epidemiological surveillance Platform.	External
Aurélien FLON-REBOURS	Master student in plant protection from L'institut Agro - Agrocampus Ouest, Rennes, France. Making his internship at Cirad, Saint-Pierre, Réunion.	External
Aude CHABIRAND	Plant epidemiologist and head of ANSES Saint-Pierre, Réunion.	External from an organization of the network
Camille DEMASSIEUX	Epidemiologist and doctor in veterinary sciences. Coordinator of cattle health management plan in Réunion. Project leader on plant epidemiological surveillance	External from an organization of the network
Ismaël HOUILLON	Graduate student at Cirad, ANSES and Inrae conducting research on the optimization of plant epidemiological surveillance in French oversea territories.	External from an organization of the network
Virginie RAVIGNE	Researcher at Cirad. Population biologist. Joint coordinator of a HLB working group for the French plant epidemiological surveillance platform. Member of the technical and scientific committee of the HLB surveillance network of Réunion.	Internal

Table 2. Professional organizations and positions of the 27 interviewees.

Institut	**Number of actors interviewed**	**Place in the surveillance network**
DGAL	2	Steering unit
DAAF	4	Steering unit / Field Coordination Unit
FDGDON	3	Field Coordination Unit / Research unit, Laboratory expertise
ANSES	3	Research unit, Laboratory expertise
Cirad	3	Research unit, Laboratory expertise
Arifel (Association Réunionnaise Interprofessionnelle Fruits et Légumes)	1	Professionals involved in monitoring and beneficiaries
Armeflhor	1	Professionals involved in monitoring and beneficiaries
Chambre Agriculture	2	Professionals involved in monitoring and beneficiaries
Garden center and shop	2	Professionals involved in monitoring and beneficiaries
Cooperatives	1	Professionals involved in monitoring and beneficiaries
Plant nurseries	3	Professionals involved in monitoring and beneficiaries
UHPR (Union des Horticulteurs et Pépiniéristes de la Réunion)	1	Professionals involved in monitoring and beneficiaries
Conseil Départemental de la Réunion	1	Other

3. Results

Here we describe the scores obtained by the HLB surveillance network of Réunion for each essential function of surveillance systems as depicted in Fig.1. Scores were highly variable across functions.

Sections relative to network organization (sections 1-3) received intermediate scores. Objectives of the network (section 1, score 67%) were considered relevant. But they lacked formalization. No easily accessible reference document currently exposes the objectives, structure and means of the network for the actors and collaborators of surveillance themselves, or for other citrus production stakeholders and the public. This absence of a clear presentation of the network may trigger misunderstandings and compromise acceptability in an already degraded socio-economic context. The central organization of the network (section 2, score 52%), which relies on both DGAL in continental France and DAAF in Réunion showed three main weaknesses. First, central functions are ensured by a very limited number of agents (less than five in total), who all share their time with all other sanitary issues of plants cultivated in Réunion (hence a diversity of crops and pests), so that only a small amount of their time is truly dedicated to HLB surveillance. Second, how the network works is not formalized enough. This lack of reference texts describing the functions ensured and the people in charge can be attributed to the very small size of the network: actors know each other very well and tend to consider that roles are already clear to everyone. Third, links between DGAL and DAAF need reinforcement. DGAL supervises the actions of DAAF, mainly through budget negotiation and validation. Technical supervision of DAAF and other local actors of surveillance could help the network evaluate its performance by using an outsider's insight. Field institutional organization (section 3, score 67%) mainly relies on FDGDON under the supervision of DAAF. In this section, individual criteria obtained homogeneous scores, not excellent but good. FDGDON is capable of collecting samples in a relatively harmonized manner over the whole Réunion territory. Human resource and funding are considered sufficient by the delegated body to fulfill the objectives fixed by DAAF each year. However, field institutional organization constrained to some extent the surveillance strategy. For instance, the initial absence of a good database referencing commercial orchards has strongly limited possibilities of surveillance over the first years. Similarly, yearly surveillance plans have explored two to three municipalities at a time to facilitate the organization of field work, so that the full coverage of Réunion was only attained after three years. Statistically it would have been preferable to sample orchards all around the island each year, but this makes field work more complex to organize.

The highest score was obtained for laboratory (section 4, score 82%). The network relies on two laboratories: the ANSES laboratory of Réunion, and the laboratory branch of FDGDON, called Clinique

du Végétal. Both laboratories operate under strict regulations. They use standardized protocols. They have to prove their ability to perform diagnostics through yearly inter-laboratory evaluation tests. The amount of human resource is considered appropriate for routine work. Human resource and technicity may however limit the ability of Clinique du Végétal to cope with sanitary crises, i.e., the number of diagnostic tests needed increases over a short period of time. The only real weakness of laboratories of the network is the technicity and speed of data management. Paper notes from field are transcribed in an excel file used to collect molecular tests results. Both the file content and format varied across the evaluated period. Backups and data transmission were not automated, jeopardizing safe and quick data transfer within FDGDON and paving the way for occasional delays.

Surveillance tools obtained high scores as well (section 5, score 73%). The network relied on an original field sampling strategy, collectively build with the technical and scientific committee of steering comitee. The strategy aimed at minimizing the risk of false negative orchards in areas of low disease prevalence, which enabled testing for the existence of exempt areas. The strategy is not officially recognized in France, but it is sound relative to the objectives of the network. For diagnostic, the network combined random sampling and molecular tests based on the official method, and never relied on symptoms, which are notoriously misleading in the situation of Réunion (high prevalence of Tristeza, suboptimal water and nutrient management, and varieties with important tolerance). Weaknesses of surveillance tools are (i) the collection and management of metadata associated with samples (e.g., GPS coordinates, grower's ID, citrus species, and variety), which are not automated enough, possibly generating errors, (ii) delays between positive diagnostic and citrus grower information, (iii) the acceptability of management actions resulting from the surveillance for both actors of surveillance themselves and citrus growers due to the mandatory culling of positive trees.

In contrast, surveillance procedures (section 6) obtained moderate scores (57%). The surveillance strategy was considered appropriate to fulfill the objectives of mapping the presence of contaminated orchards, delimit an exempt area, and testing for an elevation threshold above which the disease is absent. But some secondary objectives of the network were not covered by the surveillance strategy: psyllid vectors have not been actively monitored and some potentially important reservoirs of HLB have not been included in regular surveillance (gardens for instance).

Data management is an important weakness of the network (section 7, score 28%). Different softwares were used by the actors to handle data. The use of a regularly updated georeferenced database was not common practice for many actors. Important data such as diagnostic results and their associated metadata were treated in the form of Excel files, which format and exact content have evolved in the course of the evaluated period. In the absence of proper metadata, data cleansing was restricted to

very basic verifications. This weakness seemed mainly attributable to (i) misunderstandings on the exact roles of actors (who is in charge of orchard mapping, metadata handling, data cleansing…), and (ii) a lack of human resource with skills in database management. To cope with this difficulty, the network mandated researchers from Cirad to perform data cleansing and interpretation, but this situation was only a temporary win-win agreement not meant for long term.

Training section (section 8) obtained a score of 53%. Apart from field data collectors, who have regular opportunities to train and are systematically trained to HLB surveillance, actors of surveillance all mentioned a deficit of training. The main identified cause was the lack of availability rather than an inappropriate or insufficient panel of training courses.

The lowest scores were obtained for downstream functions: communication (17%) and evaluation (0%). The network did not come up with a dedicated communication strategy towards the public or citrus growers. Some communication occasionally occurred through yearly bulletins on the state of fruit and vegetable production in Réunion by FDGDON and Chambre d'Agriculture, as well as through a small congress gathering stakeholders and the public around citrus production. For the public and stakeholders, general information on the biology of HLB and on the actors of surveillance is easily accessible on a variety of websites. But no up-to-date information on the epidemic is available. Evaluation was not performed by the network over its first five years of existence.

Following the OASIS method, scores obtained for each criterion in each section were clustered and weighted to illustrate critical control points of the surveillance process (Fig.2). Results show that despite the lack of human resource and the isolation from other territories, actors of surveillance have somehow managed to perform well on the core aspects of surveillance: defining clear and relevant objectives (67%), performing adequate sampling (82%), using adequate tools in the laboratory and the field (92%) and collecting useful data (61%). Coordination obtained a moderate score (54%) partly reflecting the isolation of the network from continental France, partly due to the small size of the network, where actors do not feel the need to actively coordinate in addition to their many informal interactions. Critical weaknesses of the network are data analysis, information and dissemination. Data have been regularly analyzed by researchers collaborating within the technical and scientific committee of steering comitee, providing information directly used to fuel adjustements of surveillance strategy. The network has regularly summarized its findings to the local authorities during the dedicated CROPSAV meetings. But no formal document summarizing the main results on the state and dynamic of the epidemic has been produced for other agriculture stakeholders, the citrus growers or the public.

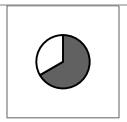
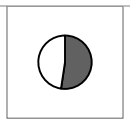
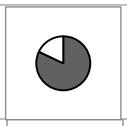
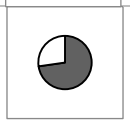
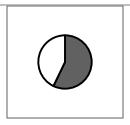
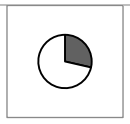
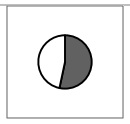
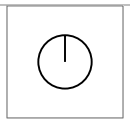
Functional section	Graphic	Score/Maximum possible score
Section 1: Objectives and scope of surveillance		8/12
Section 2: Central institutional organization		11/21
Section 3: Field institutional organization		8/12
Section 4: Laboratory		32/39
Section 5: Surveillance tools		24/33
Section 6: Surveillance procedures		12/21
Section 7: Data management		6/21
Section 8: Training		8/15
Section 9: Communication		3/18
Section 10: Evaluation and performance indicators		0/6

Fig. 1. Scores of the HLB surveillance system of Réunion obtained for the 10 OASIS functional sections.

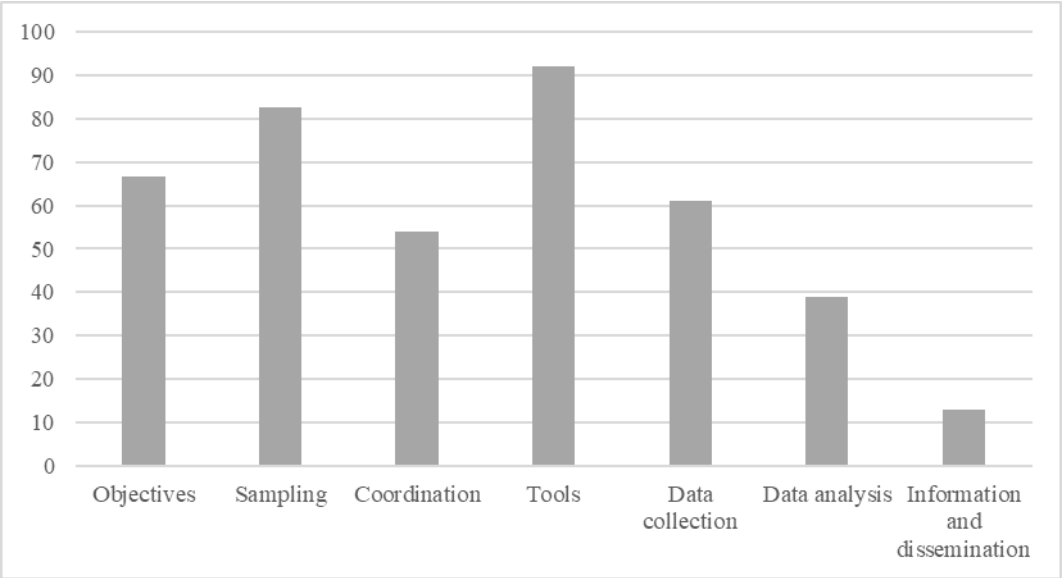


Fig. 2. Scores of the HLB surveillance system of Réunion obtained for the seven OASIS critical control points indicated in percentages of the maximum possible score.

A complementary re-arrangement of criteria allowed illustrating attributes of the network (Fig.3). The network performed particularly well in terms of specificity (85%), representativeness (75%), and simplicity (73%), three attributes that benefitted from important efforts of the network to set up a feasible and sound sample collection strategy conditionally on the human resource available. Its main weaknesses were usefulness (52%), flexibility (51%) and timeliness (44%). Lack of flexibility is mainly attributable to deficits of human resources that constraint the distribution of field and laboratory work both during the year and in terms of spatial distribution of samples. Usefulness and timeliness are mostly deteriorated by delays in the transcription of results from the laboratory to official state databases and the lack of dedicated communication strategy allowing to provide stakeholders, citrus growers and the public with a clear updated state of the epidemic.

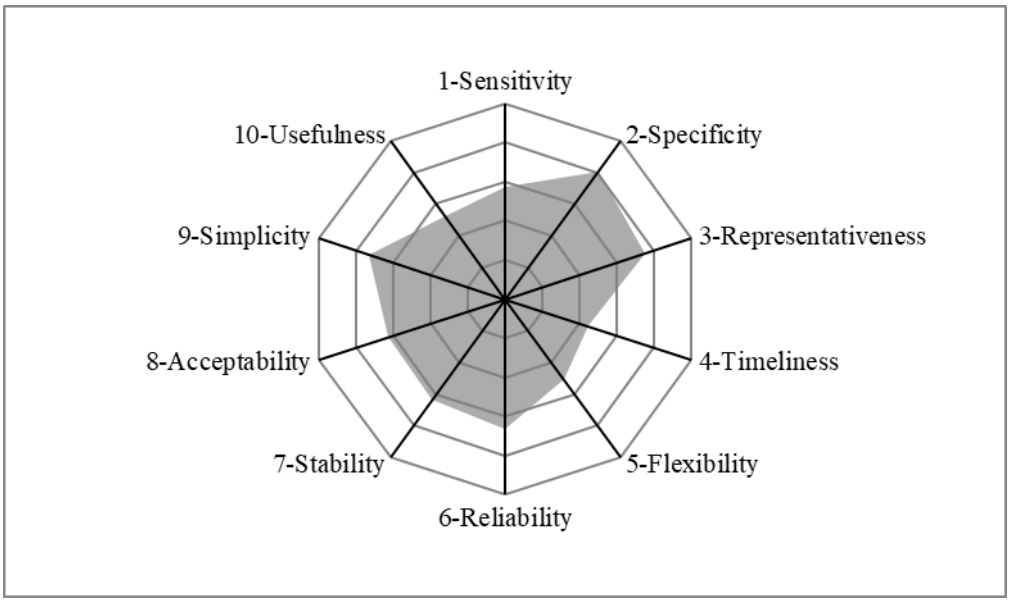


Fig. 3. Scores of the HLB surveillance system of Réunion obtained for the 10 OASIS attributes (indicated in proportions of the maximum possible score).

4. Discussion

To our knowledge, the present study is one of the very first evaluations of a plant epidemiological surveillance network, and the first in an oversea territory. Using the OASIS semi-quantitative method, we thoroughly analysed the strengths and weaknesses of a small surveillance network facing a particularly challenging disease.

From this evaluation, key success factors of the network were identified. Firstly, actors and collaborators of the network were able to collectively define a rigorous field sampling strategy designed to meet clear objectives, through frequent meetings and informal exchanges. Secondly, samples were treated using very adequate laboratory tools, i.e., the official method, in a laboratory respecting national terms of reference, under the supervision of the official national reference laboratory. In other words, in a situation a great isolation from other national territories and with very few skills locally available, the network has somehow managed to ensure the core functions of surveillance, i.e., the production of reliable data to shed light on the epidemic at stake. Indeed, after five years of existence, the network has established the existence of a contaminated area in all municipalities of the South and East of the island, where the proportion of infected orchards is about 10 % (Chapitre 2B). It was also shown that in contrast, the Center and West municipalities were quasi-exempt, i.e., commercial orchards are generally exempt of the disease, with few exceptions, where

trees were culled immediately after detection (Chapitre 2B). Actors of the network also achieved real-time data cleansing and interpretation through a win-win agreement with local researchers working on the optimization of epidemiological surveillance. In the hand of researchers, surveillance data produced by the network enabled the inference of an elevation threshold of 881 m above which the disease is absent. Such threshold is compatible with entomologists's observations. Populations of *T. erytreae* are considered as relictual, and only populations of *D. citri*, still controlled by their parasitoid *T. radiata*, are able to transmit the disease (Bernard Reynaud, pers. comm.). *D. citri* is notoriously restricted to low elevations, but it was formerly though that the elevation threshold would stand at 600 m (Bové and Garnier, 1984). Lastly, surveillance data enabled a first risk inference, suggesting that in addition to elevation, citrus production landscape structure was an important predictor of orchard contamination risk (Chapitre 2B).

Two main areas of improvement were highlighted by the OASIS analysis. The most important one referred to data management. Over the evaluated period, the network met difficulties with collecting correct metadata along with samples in the field, keep track of metadata during laboratory treatments, and transcribing cleansed data into official databases in constantly acceptable delays. Core metadata included owner's ID and GPS coordinates of the sample, which are essential to perform tree culling in case of positive diagnostic. They were systematically provided with occasional (but potentially highly problematic) errors. Accessory metadata included citrus species and varieties, tree age, agricultural practices. They were to be written in a "comments" section in field paper guides, and they were thus frequently omitted or imprecisely documented, though they would have been much useful to interpret the epidemiological situation. To improve this essential function of surveillance, we would advise (i) that actors of surveillance become more aware of the key role of accessory metadata, maybe through training courses on data management and interpretation and by appropriating the data quality guide established by the Plant Health Epidemiological Suveillance Platform, (ii) that help is provided to the main operator, FDGDON to hire expert skills in database management and be equipped with modern tools facilitating safe data collection and transfer (e.g., field connected devices, and proper database management software).

A second weakness of the network was a general deficit of internal and external communication. Likely as a consequence of the very small size of the network, actors know each other very well. They work in very close locations (ANSES, part of FDGDON, Cirad share the same building, just aside DAAF and Chambre d'Agriculture buildings). They have multiple opportunities to meet because they all work on

several sanitary issues of Réunion crops. As a consequence, they have not felt the need for a proper strategy to internally communicate on the objectives and means of the network, on the roles of each actor and collaborator and on the lights shed by surveillance onto the state of the epidemic. While information is relatively well shared between actors and collaborators, this absence of any explicit accessible document sets the stage for misunderstandings, and causes actors and collaborators to have variable amounts of information on the work done. Importantly, communication of surveillance results to the steering committee has always be provided in due time. External communication mainly suffered from the head of the network being overwhelmed with a diversity of objectives other than HLB surveillance, and prioritizing data production over communication. Obviously, for a disease as problematic as HLB, communicating knowledge on the state of the epidemic to citrus stakeholders and the public requires much precautions, but it is also an essential step towards a better acceptability of disease management options. Now that the network has come to a satisfactory description of the epidemic, it is certainly time to elaborate a collective strategy to communicate surveillance results.

This detailed investigation bears lessons for authorities in charge of setting up a plant epidemiological system in situations where budget or human resource are highly limitant, as e.g., in EU ultraperipheral regions or on crops of secondary or local importance. In Réunion, local actors managed to ensure core functions of surveillance. We may hypothesize that in many situations, on diseases easier to monitor than HLB, data production can be achieved by a small number of actors. Small size is not always a problem, it is sometimes a solution. When all actors know each other and are able to communicate directly through frequent physical encounters, internal communication can be fast. Small-sized networks may have a certain creativity and an ability to rapidly adapt their procedures. But as illustrated here, such networks may need help from the central level to functions considered as non-vital to surveillance such as communicationa and evaluation. France has recently set up a national platform for plant epidemiological surveillance, which could and will certainly be of great help to achieve these goals. At the time of writing, the platform already produces weekly newsletters summarizing knowledge on HLB epidemics and surveillance worldwide and collaborates with the network through a dedicated HLB working group to procude an application with R shiny package (Chang *et al*., 2018) allowing to communicate the state of the epidemic and risk maps to the public.

Because of OASIS presents as a rigorous framework, the present evaluation can be compared with another recent OASIS evaluation of the surveillance network on antiobiotic resistance named RESAPATH (Mader *et al*., 2021). It is a much larger network based on numerous volunteering

laboratories in continental France. Strikingly strengths and weaknesses of that large network were almost the exact opposite of those of the HLB surveillance network of Réunion. RESAPATH benefitted from very strong central organization, with expert skills in epidemiology and microbiology at the central level, and had a very thorough and efficient internal and external communication strategy based in newsletters and R shiny applications. Its weaknesses were more related to field institutional organization and surveillance tools, posing problems for data collection, and representativeness. The architecture of RESAPATH is based on a motivated and skilled central team exploiting the existence of a large number of laboratories producing data with variable levels of technicity and quality. In contrast, the HLB surveillance network of Réunion dwells on a small number of key local skills in disease diagnostic, statistics, epidemiology, and plant pathology, who responded to the need to monitor HLB. The network was thus designed around data production, following strict terms of reference. These two networks therefore illustrate complementary manners to operationally deploy surveillance on a territory.

The OASIS tool proved successful to analyse the structure and functioning of the network. However, OASIS remains both a generic tool and some debates have occurred on the relevance and interpretation of some of its evaluation criteria in the specific case of a small-sized plant surveillance system. For instance, OASIS decomposes the network structure into a central level, which can be interpreted as a national level, and an intermediate level, where several regional organizations need being coordinated. In Réunion, both levels were confounded and central and intermediate functions were ensured by the same persons. We chose to keep central and intermediate functions separated for the evaluation, because it helped clarifying on what precise function scores were attributed. All criteria relative to coordination between intermediate units were then considered as irrelevant. But alternative choices could have been made, as e.g., suppressing all criteria relative to intermediate level. OASIS is also an interpretative tool. Assessing whether a sampling strategy is representative enough, or whether funding or human resource are sufficient, will always depend on the implicit behind “enough” or “sufficient”. For instance, in the HLB surveillance network of Réunion, actors and collaborators did not express and concern about funding or human resource limitations for field work. In 2017, when the technical and scientific committed acted that the sampling strategy had to upgrade, DAAF provided the network with the resources required. But with even more resources, surveillance could have been upgraded further, allowing more thorough exploration of orchards, or pursuing complementary objectives such as tracking HLB into reservoirs outside commercial orchards (e.g., gardens) or tracking psyllid vectors… The notion of “enough” is relative to an objective, but objectives are also built relative to what is feasible conditionally on resources. Ultimately, available resources

have to be arbitrated by prioritizing sanitary issues (and therefore surveillance networks) according to the importance of the disease for the considered crop, of the socio-economic importance of the crop, and of the expected added value of surveillance in that system. While such prioritization is clearly organized in the human and animal health sector (*e.g.*, a list of 117 priority animal diseases was established by OIE with for each one a detailed data sheet in free access), it is still an ongoing challenge for many territories in the plant health sector. As a consequence, despite the very precise OASIS guidelines, there will still be room for harmonization of OASIS uses between case studies, especially in for plant epidemiological surveillance. Mader *et al*. (2021) recommended having at least one external evaluator being experienced with the OASIS method to advise such decisions, as it was the case during our study, and to record decisions for future evaluations, a recommendation we do share.

Acknowledgements

We are very grateful to all the professionals interviewed for this evaluation and/or participating in the full-day review meeting on 15 July 2021. We are also thankful to Pascal Hendrikx and Jean-Philippe Amat for his technical support on the OASIS tool.

5. References

Anses, 2021. ANSES_LSV_MA063_V2. https://www.anses.fr/en/system/files/ANSES_LSV_MA063_V2.pdf

Anses, 2018. Demande n°2018-SA-0221 « OASIS REPHYTOX ». https://www.anses.fr/fr/system/files/LABORATOIRE2018SA0221Ra-1.pdf

Aubert, B., Grisoni, M., Villemin, M., Rossolin, G., 1996. A Case Study of Huanglongbing (Greening) Control in Reunion. International Organization of Citrus Virologists Conference Proceedings (1957-2010) 13. https://doi.org/10.5070/C58024t7fj

Bové, J.M., 2006. HUANGLONGBING: A DESTRUCTIVE, NEWLY-EMERGING, CENTURY-OLD DISEASE OF CITRUS. Journal of Plant Pathology 88, 7–37.

Bové, J.M., Garnier, M., 1984. Citrus Greening and Psylla Vectors of the Disease in the Arabian Peninsula. International Organization of Citrus Virologists Conference Proceedings (1957-2010) 9. https://doi.org/10.5070/C547K0S54Z

Chang, W., Cheng, J., Allaire, J., Xie, Y., and McPherson, J. Shiny: Web Application Framework for R, 2018. URL https://CRAN.R-project.org/package=shiny. R package version 1.2.0. [p503, 506]

Costa, G.V. da, Neves, C.S.V.J., Bassanezi, R.B., Leite Junior, R.P., Telles, T.S., 2021. Economic impact of Huanglongbing on orange production. Rev. Bras. Frutic. 43. https://doi.org/10.1590/0100-29452021472

Cunniffe, N.J., Stutt, R.O.J.H., DeSimone, R.E., Gottwald, T.R., Gilligan, C.A., 2015. Optimising and Communicating Options for the Control of Invasive Plant Disease When There Is Epidemiological Uncertainty. PLOS Computational Biology 11, e1004211. https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1004211

DGAL/SDSPV/2021-807, 2021. https://info.agriculture.gouv.fr/gedei/site/bo-agri/instruction-2021-807

Dupré, M., Michels, T., Le Gal, P.-Y., 2017. Diverse dynamics in agroecological transitions on fruit tree farms. European Journal of Agronomy 90, 23–33. https://doi.org/10.1016/j.eja.2017.07.002

Gottwald, T.R., 2010. Current Epidemiological Understanding of Citrus Huanglongbing. Annual Review of Phytopathology 48, 119–139. https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-073009-114418

Hendrikx, P., Gay, E., Chazel, M., Moutou, F., Danan, C., Richomme, C., Boue, F., Souillard, R., Gauchard, F., Dufour, B., 2011. OASIS: an assessment tool of epidemiological surveillance systems in animal health and food safety. Epidemiology & Infection 139, 1486–1496. https://doi.org/10.1017/S0950268811000161

Irey, M.S., Gast, T., Gottwald, T.R., n.d. COMPARISON OF VISUAL ASSESSMENT AND POLYMERASE CHAIN REACTION ASSAY TESTING TO ESTIMATE THE INCIDENCE OF THE HUANGLONGBING PATHOGEN IN COMMERCIAL FLORIDA CITRUS 5.

Lee, J.A., Halbert, S.E., Dawson, W.O., Robertson, C.J., Keesling, J.E., Singer, B.H., 2015. Asymptomatic spread of huanglongbing and implications for disease control. Proceedings of the National Academy of Sciences 112, 7605–7610. https://doi.org/10.1073/pnas.1508253112

Li, S., Wu, F., Duan, Y., Singerman, A., Guan, Z., 2020. Citrus Greening: Management Strategies and Their Economic Impact. HortScience 55, 604–612. https://doi.org/10.21273/HORTSCI14696-19

Mader, R., Jarrige, N., Haenni, M., Bourély, C., Madec, J.-Y., Amat, J.-P., 2021. OASIS evaluation of the French surveillance network for antimicrobial resistance in diseased animals (RESAPATH): success factors underpinning a well-performing voluntary system. Epidemiology & Infection 149. https://doi.org/10.1017/S0950268821000856

Oliveira, J.M.C. de, Nascimento, A.S. do, Miranda, S.H.G. de, Barbosa, C. de J., Laranjeiras, F.F., 2013. Estimativa dos impactos econômicos decorrentes de eventual introdução do huanglongbing (HLB) no estado da Bahia. Rev. Bras. Frutic. 35, 755–762. https://doi.org/10.1590/S0100-29452013000300012

Parnell, S., Gottwald, T.R., Riley, T., Bosch, F. van den, 2014. A generic risk-based surveying method for invading plant pathogens. Ecological Applications 24, 779–790. https://doi.org/10.1890/13-0704.1

Pelz-Stelinski, K.S., Martini, X., Kingdom-Gibbard, H., Stelinski, L.L., 2017. Patterns of habitat use by the Asian citrus psyllid, Diaphorina citri, as influenced by abiotic and biotic growing conditions. Agricultural and Forest Entomology 19, 171–180. https://doi.org/10.1111/afe.12197

Peyre, M., Hoinville, L., Njoroge, J., Cameron, A., Traon, D., Goutard, F., Calba, C., Grosbois, V., Delabouglise, A., Varant, V., Drewe, J., Pfeiffer, D., Häsler, B., 2019. The RISKSUR EVA tool (Survtool): A tool for the integrated evaluation of animal health surveillance systems. Preventive Veterinary Medicine 173, 104777. https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2019.104777

Regulation (EU) 2016/2031 of the European Parliament and of the Council of 26 October 2016 on protective measures against organisms harmful to plants, amending Regulations (EU) No 228/2013, (EU) No 652/2014 and (EU) No 1143/2014 of the European Parliament and of the Council and repealing Council Directives 69/464/EEC, 74/647/EEC, 93/85/EEC, 98/57/EC, 2000/29/EC, 2006/91/EC and 2007/33/EC, 2016. , OJ L.

Teck, S.L.C., Fatimah, A., Beattie, A., Heng, R.K.J., King, W.S., 2011. Influence of Host Plant Species and Flush Growth Stage on the Asian Citrus Psyllid, *Diaphorina citri* Kuwayama. American Journal of Agricultural and Biological Sciences 6, 536–543. https://doi.org/10.3844/ajabssp.2011.536.543

6. Supplementary material

The supplementary material for this article can be found at https://www.plateforme-esa.fr. Documents and worksheets for conducting an OASIS assessment are available.

Conclusion et perspectives

1. Conclusion générale

1.1. Les objectifs de la thèse

La question scientifique centrale qui a animé ce travail de thèse était de savoir si l'amélioration de la surveillance était possible à la Réunion, dans un contexte si particulier (paysage fragmenté, territoire de faible surface, limitation des moyens humains et financiers pour la surveillance des maladies de plantes). Le but n'était pas seulement d'apporter une réponse tranchée pour la surveillance à la Réunion mais d'avoir des pistes de généralisation pour des territoires similaires (autres DROMs par exemple) et pour des situations épidémiologiques similaires. Le modèle biologique utilisé pour ce travail est le HLB, maladie particulièrement dévastatrice et difficile à suivre comme à éradiquer. Sur des territoires de petite surface, avec des paysages très hétérogènes et des moyens limités comme la Réunion, ces difficultés sont renforcées. Les bactéries responsables du HLB sont des organismes soumis à règlementation, ainsi que les psylles vecteurs (Annexe II, Partie A, Chapitre 1 de la Directive n°2000/29/CE). A la Réunion, un arrêté préfectoral a été établi pour les mesures de lutte avec l'arrachage des lots d'arbres positifs au HLB (N°2012-/1083/SG/DAAF).

1.2. Résultats principaux

A partir de l'hypothèse que la structure du paysage influençait l'épidémie de HLB à la Réunion et la constatation que la connaissance du paysage n'était pas représentative du parcellaire réel, une reconstitution du parcellaire des vergers d'agrumes a été conduite et expliquée dans le chapitre 1. La photo-interprétation d'images satellites doublée de la vérification sur le terrain a permis de déterminer un parcellaire avec cinq fois plus de vergers d'agrumes identifiés que celui initialement connu. Bien que ce travail soit très demandeur en temps, il ne peut être remplacé complétement pour de l'identification automatisée, cette dernière permettant tout de même d'orienter les sorties terrain. Une couche d'information géographique de cette cartographie des vergers d'agrumes et des autres vergers n'étant pas des agrumes à la Réunion a été produite et mise à disposition sur demande dans le catalogue web AWARE du Cirad (Fig.7).



Figure 7 : Vue d'écran de la cartographie des vergers réalisée sur le catalogue Aware (https://aware.cirad.fr/layers/geonode:agrumes).

Une fois le parcellaire établi, des simulations d'épidémies de HLB dans le paysage des vergers d'agrumes réunionnais ont été effectuées. Bien que ces simulations n'aient eu qu'un but illustratif et non pas d'estimer les paramètres de la maladie, nous avons pu noter une différence entre le parcellaire initialement connu et celui issu du travail de cette thèse. Cela nous a permis de mettre en avant la notion de **poche de connectivité**, à savoir le réseau que forment des parcelles dont la connectivité potentielle entre elles permet à la maladie de se propager. L'amélioration du parcellaire a montré qu'il est possible de sous-estimer ces poches et les parcelles intermédiaires qui les relient dans le cas d'une connaissance partielle du parcellaire. Si les vergers d'agrumes à la Réunion sont mieux connus grâce à cette étude, il reste deux compartiments potentiels moins pris en compte, les agrumes des jardins de particuliers et les buissons de buis de Chine (*Murraya paniculata*). Le rôle des jardins a été démontré dans le chapitre 2B, avec **une influence positive sur la présence de HLB dans un verger de la distance minimale à un jardin contenant un ou des agrumes contaminés**. Or dans huit zones urbaines différentes réparties sur tout le territoire réunionnais, nous avons pu échantillonner des agrumes chez les particuliers et nous avons trouvé du HLB dans chaque zone (Fig.8).

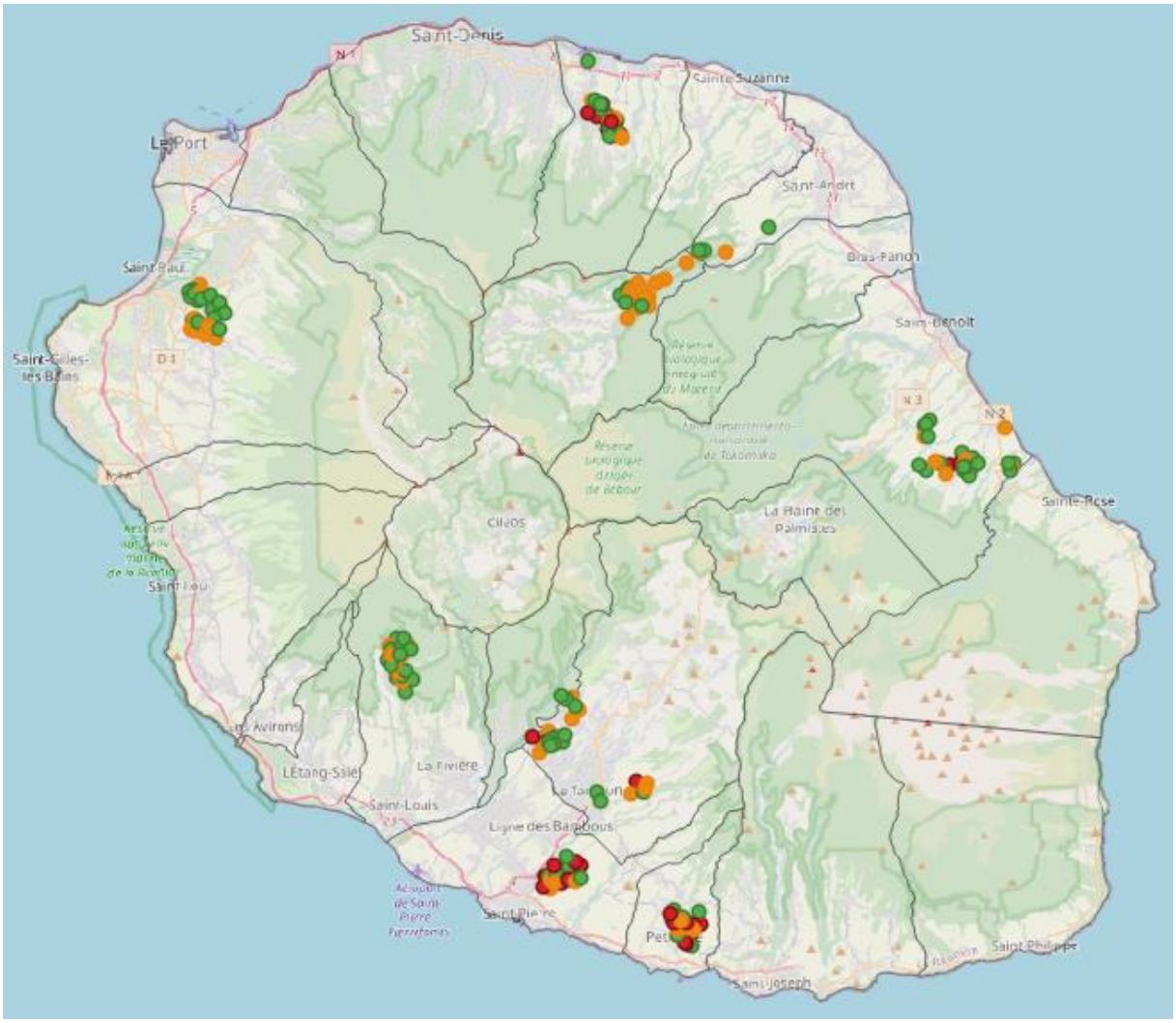


Figure 8 : Cartographie des échantillonnages dans les jardins des particuliers. Les points verts, oranges, rouges représentent respectivement les échantillons négatifs, faiblement positifs et fortement positifs. Les coordonnées ont été bruitées aléatoirement pour le respect de la protection des données privées.

Ce constat amène à se demander si les jardins des particuliers n'assureraient pas un maillage du territoire tel que les poches de connectivités seraient au final reliées entre elles en un seul réseau connecté. Une des implications qui en découle est que les capacités de dispersion de la maladie ne sont que peu importantes puisque même à une faible distance un autre hôte existe. De plus, s'il y a eu un front de propagation épidémiologique du Sud (là où la maladie a été détectée comme réémergente en 2015), les jardins de particuliers seraient une des explications pertinentes au passage de la maladie dans les vergers de l'Ouest et du Nord ainsi que des Salazie malgré seulement quelques vergers intermédiaires, ces zones étant reliées par des surfaces urbanisées où il n'est pas rare d'avoir au moins un agrume dans un jardin particulier. Les buissons de *Murraya paniculata* s'ajoutent au problème que soulèvent les jardins. En effet, si ces Rutacées ne font pas encore consensus comme compartiment

épidémiologique dans les épidémies de HLB (Walter *et al*., 2012), ils sont reconnus comme compartiment biologique et attractif du vecteur *D. citri* (Beloti *et al*., 2018). Initialement introduit pour l'ornement au 18ème siècle dans les Mascareignes, les branches de cette plante sont utilisées à la Réunion pour la fête des Rameaux. Nous n'avons pu quantifier la couverture que représente *M. paniculata* dans le paysage réunionnais. Cependant, étant une espèce envahissante à la Réunion (Index Conservatoire botanique national de Mascarin, 2017), nous pouvons supposer un important déploiement. *M. paniculata* pourrait donc non seulement constituer des viviers à psylles vecteurs de HLB mais surtout servir d'intermédiaire entre deux vergers d'agrumes à l'échelle du paysage. Néanmoins, il est encourageant de voir la Réunion comme un territoire suffisamment petit pour avoir une bonne estimation de la répartition des hôtes. Nous avons pu établir un parcellaire d'une culture secondaire proche de la réalité alors que par exemple sur le territoire métropolitain il serait plus compliqué de mettre cela en place. D'ailleurs sur le Registre Parcellaire Graphique de 2020, mises à part les grandes cultures du type blé, maïs, tournesol, les cultures « secondaires » sont regroupées par exemple dans les catégories « vergers » ou « fruits à coque ».

Après avoir expliqué la structure des localisations des vergers d'agrumes à la Réunion et l'impact sur l'épidémie de HLB, nous avons mis en relation les relevés de présence / absence de HLB par la surveillance officielle ainsi que les données de recherche avec le parcellaire mais aussi les variables éco-climatiques susceptibles d'influencer les vecteurs de la maladie. En plus d'établir un **lien entre la présence du HLB et des variables comme l'altitude, les températures maximales et la connectivité**, nous avons pu cartographier le risque sur l'ensemble du territoire réunionnais. Cependant cette inférence du risque n'a pas été adossée à un modèle épidémiologique dynamique comme dans d'autres études sur le risque (Parnell *et al*., 2014 ; Soubeyrand et Martinetti, 2018). L'une des limitations que nous avons rencontrées ici, c'est la limitation de l'information délivrée par les statuts sanitaires de relevés de HLB sur le terrain. D'une part, il y a eu très peu de passages successifs aux mêmes endroits (quatre vergers sur sept années), il est donc compliqué d'avoir une idée de la dynamique de l'épidémie. Une des raisons à cela est la difficulté de repasser dans certaines zones, comme Petite-Ile, par manque d'acceptabilité des mesures de lutte par les exploitants. Pour contourner ce problème, les relevés sont traités dans les calculs et les modèles sans prendre en compte leur date. D'autre part, le statut du HLB d'Organisme de Quarantaine soumis à une lutte obligatoire rend incontournable l'arrachage d'un arbre identifié malade par la surveillance. Ainsi, l'échantillonnage s'étalant sur plusieurs années, certains points de relevés positifs ne contribuent plus à l'épidémie car ils ont été retirés de la population d'hôtes. Malgré cela, l'inférence du risque réalisée pourrait servir pour l'orientation des prises de décisions d'exploitants agricoles en privilégiant les zones d'altitudes et isolées pour la culture d'agrumes à la Réunion (chapitre 2B).

Afin de couvrir également l'aspect organisationnel et la mise en œuvre de la surveillance, une évaluation du dispositif de surveillance du HLB à la Réunion a été conduite grâce à la méthode OASIS. Elle constitue l'une des premières applications de cette méthode en santé végétale et la première évaluation avec OASIS d'un système de surveillance dans les DROM. En effet, la méthode OASIS a initialement été développée par les systèmes de surveillance en santé animale mais peut être transposée à la surveillance en santé végétale comme c'est le cas pour la surveillance de *X. fastidiosa*, dont l'évaluation OASIS est à paraitre. Nous avons pu mettre en avant la qualité des échelons assurant la collecte des données et les analyses au laboratoire. Une piste d'amélioration proposée est de développée **la communication pour augmenter l'acceptation de la surveillance** très associée à la lutte par arrachage, cette dernière étant ressentie comme fortement coercitive. Nous pouvons souligner le fait que la taille du dispositif nous a permis d'interroger tous les acteurs de la surveillance. A plus grande échelle et notamment pour les dispositifs de surveillance en métropole, il est plus difficile de conduire un grand nombre d'entretiens des acteurs afin que ceux-ci soient suffisamment représentatifs. Dans le cadre de l'évaluation OASIS du dispositif de surveillance du HLB à la Réunion, tous les acteurs ont pu être interrogés et même des personnes bénéficiaires ne participant pas directement à la surveillance. Pour l'évaluation du dispositif de l'organisme nuisible polyphage que représente *X. fastidiosa*, 44 acteurs ont dû être interrogés afin de balayer tout le dispositif. Lorsque ces déploiements ne sont pas possibles, il existe des évaluations OASIS Flash qui permettent d'interroger moins d'acteurs. Lors de ce type d'évaluation, c'est la bonne représentativité des personnes interrogées et la qualité de leurs entretiens qui conditionnent la qualité de l'évaluation, plus que l'exhaustivité.

Ces travaux de thèse pourraient orienter les territoires ultramarins dans la surveillance du HLB et dans l'organisation de la surveillance des maladies de plantes en général.

2. Perspectives

La surveillance des maladies de plantes n'a cessé d'évoluer ces dernières décennies. En 2016, l'Union Européenne s'est dotée d'une réglementation de protection des ressources économiques, sociales, et environnementales en lien avec la santé des végétaux (Règlement (UE) 2016/2031). Au niveau national, la convergence des acteurs de la santé du végétal a conduit à l'établissement d'une collaboration entre sept organismes privés et publics pour former la plateforme d'Épidémiosurveillance en Santé Végétale (Convention cadre, 2018-121). Il serait constructif de voir où mon travail s'inscrit dans cette dynamique, notamment dans le cadre du groupe de travail

« surveillance du HLB » mis en place par la plateforme en 2021, et vers quelles évolutions il faudrait tendre.

2.1. Les possibilités d'amélioration de la surveillance par la recherche

Tout d'abord, il paraît approprié de faire la distinction entre décider la surveillance, faire la surveillance et mener des recherches scientifiques sur la surveillance. Décider la surveillance, c'est définir et catégoriser les organismes nuisibles, afin de prioriser les moyens en fonction de la menace. Il s'agit de ce qui a été défini dans le chapitre 3 comme l'unité centrale du système de surveillance ainsi que tous les échelons au-dessus. En France, bien qu'elle s'appuie sur des collaborations internationales au sein de l'UE comme l'EPPO (European and Mediterraean Plant Protection Organization), c'est la DGAL qui veille entre autres activités à la santé et à la protection des végétaux. Cependant, c'est la DAAF qui organise la surveillance des maladies de plantes à la Réunion en réunissant différentes institutions partenaires autour de comités de pilotage et en missionnant une entité locale pour la surveillance du HLB. Cette entité missionnée, la FDGDON, constitue l'unité intermédiaire qui fait la surveillance. Elle récolte les échantillons de plantes sur le terrain et réalise les analyses en laboratoire. Faire la surveillance, c'est donc établir un statut sanitaire des plantes dont la surveillance est organisée.

En revanche, la recherche scientifique sur la surveillance des maladies a pour but d'améliorer les connaissances sur la mise en application des plans de surveillance et l'établissement du statut sanitaire. Elle peut s'orienter sur différentes thématiques comme savoir quelles sont les plantes à surveiller, détecter une plante malade, savoir où est la maladie sur un territoire et définir quel échantillonnage est approprié à l'objectif de surveillance. Une des premières étapes des organisateurs de la surveillance est de définir ce qu'il faut surveiller. Une question à laquelle la recherche peut amener des réponses, que ce soit pour identifier les agents pathogènes responsable d'une maladie ou la gamme d'hôtes. Par exemple, dans le cas de *Xylella fastidiosa*, il a fallu mettre en évidence la grande variété des plantes hôtes possibles (Baldi et La Porta, 2017). La liste établie des plantes hôtes est mise à jour régulièrement par l'EFSA (European Food Safety Authority). La recherche peut également permettre d'avoir une idée sur la localisation des hôtes identifiés avec la télédétection. Bien que ces méthodes soient encore limitées dans la spécification précise de deux cultures similaires, comme par exemple entre les cultures arboricoles de mangues, de letchis, et d'agrumes (Dupuy *et al*., 2020), elle permet de faire des classes d'occupation des sols suffisamment informatives pour établir des zones d'échantillonnage pertinentes. Ensuite la définition d'un plan d'échantillonnage peut se faire avec les connaissances acquises par la recherche (Parnell *et al*., 2017).

Enfin la recherche est un atout majeur de la surveillance car elle peut permettre de développer de nouvelles méthodes de détection. Dans un cas comme le HLB à la Réunion, l'enjeu est d'autant plus important que l'un des facteurs limitant le temps d'établissement d'un statut sanitaire et donc l'application des mesures, est le passage obligatoire par une PCR en laboratoire. De plus, il a pu être montré quelle méthode de PCR en temps réel est la plus performante (Cellier *et al*., 2020), la méthode LAMP étant elle aussi testée (Choi *et al*., 2018). Pour s'affranchir des contraintes du laboratoire, nous avons, au travers de deux stages, tenté de développer la détection du HLB par spectroscopie. L'approche était de mesurer à la main sur des échantillons de feuilles la réflectance en fonction du statut sanitaire. Ainsi nous avons pu mettre en évidence des longueurs d'onde pour lesquelles existait une différence significative entre arbres sains et infectés au HLB (Fig.9). Puis par des algorithmes d'apprentissage, nous avons pu déterminer à partir des mesures de réflectance, le statut sanitaire des arbres avec un taux de justesse supérieur à 0,9.

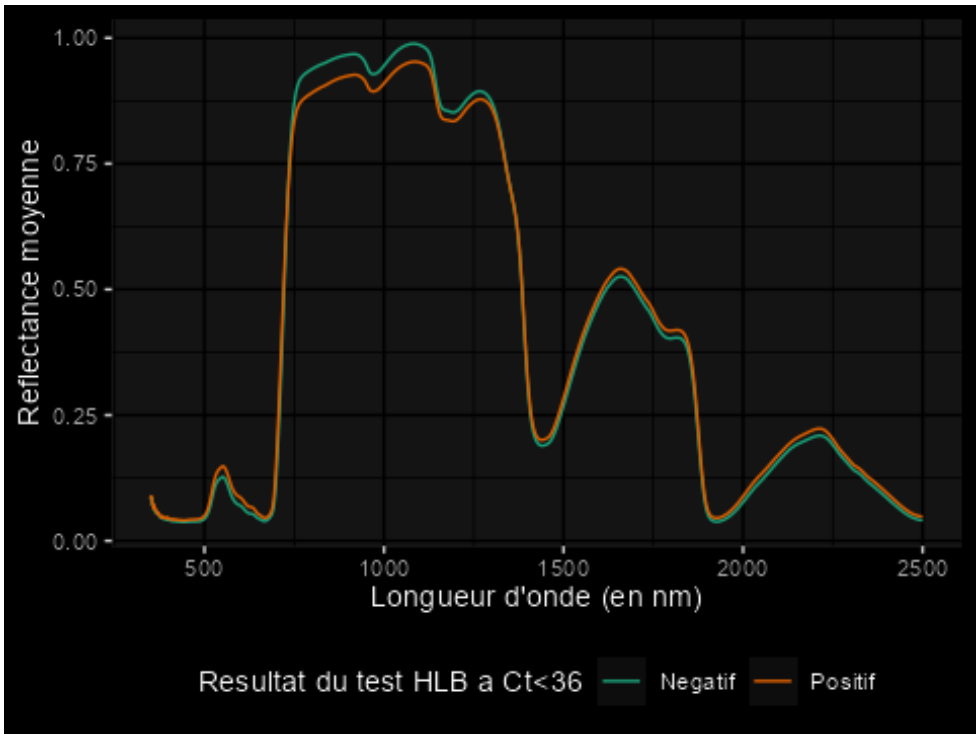


Figure 9 : Réflectance moyenne en fonction des longueurs d'ondes. Les courbes, en vert et en rouge, représentent la réflectance moyenne des arbres respectivement sains et infectés (Sorin, 2020).

Par la suite, des photographies multi-spectrales ont été prises par drones. Ces images étant encore en traitement, nous ne pouvons conclure pour l'application de cette méthode de détection à grande échelle mais le but serait, si cela fonctionne, d'établir des passages réguliers de vérification de statut

sanitaire par drone et d'envoyer chaque positif détecté en confirmation au laboratoire par les méthodes actuelles. La détection par spectroscopie permettrait ainsi de gros gains de temps en ciblant rapidement les arbres suspects, et apporterait une surveillance dynamique.

Comme nous venons de le voir la recherche peut apporter beaucoup à la surveillance. Pour cela, il faut réussir à bien échanger entre les décideurs, les acteurs et les chercheurs. Dans le cas de système de surveillance et de recherche resserrés sur un même territoire de faible surface, comme dans les DROM, il est possible d'entretenir des échanges par les rencontres formelles et informelles facilitées entre acteurs qui se connaissent.

2.2. Les échanges de données surveillance/recherche

La suite logique de l'attribution d'un rôle à chacune des parties prenantes de la surveillance est de définir les besoins en données de chacune de ces parties afin de mener à bien son rôle. Les organisateurs de la surveillance ont besoin des statuts sanitaires établis par ceux qui font la surveillance afin de prendre des décisions en connaissance de cause pour que la surveillance soit en adéquation avec la réalité épidémiologique du terrain et les objectifs, mais aussi qu'une lutte efficace soit menée. Il y a une double nécessité d'échange de données car la recherche a besoin aussi de ces données pour faire des estimations basées sur le risque.

La Plateforme ESV pourrait être le lieu pour systématiser ces échanges de données de surveillance. En effet parmi les trois axes d'activités de la plateforme que sont la surveillance, l'analyse et le conseil, il existe une équipe opérationnelle en charge de nettoyer et de mettre à disposition des données de surveillance. Pour le moment, il existe cinq Groupes de Travail (GT) avec un volet sanitaire dans le cadre de la plateforme et les données de surveillance de *X. fastidiosa* et du HLB y sont gérées. Par exemple, pour les données de surveillance du HLB à la Réunion des années 2020 et 2021, elle a nettoyé les données et les a rendues accessible aux acteurs. Bien que cela demande une validation en COPIL, d'autres dispositifs de surveillance pourraient à terme s'ajouter au catalogue de la plateforme.

Dans le cas de l'amélioration de la connaissance du parcellaire (chapitre 2A), cette nécessité s'est fait ressentir. Le point de départ de notre démarche fut la base de données officielle utilisée par les décideurs et les acteurs de la surveillance. Tout au long du processus d'amélioration, des échanges informels sur les parcelles d'agrumes ont eu lieu. A l'issues de notre travail, la base de données sur les vergers d'agrumes à la Réunion la plus aboutie est en ligne et à disposition de personnes impliquées dans la surveillance du HLB sur demande.

Ces échanges sont d'autant plus importants sur les données mêmes de la surveillance, les statuts sanitaires des plantes. Dans le chapitre 2B, pour inférer le risque, les données de présence/absence de la maladie étaient nécessaires. Ces données provenaient des données de surveillance officielle que nous avions aidé à nettoyer ainsi que des données propres à la recherche, prélevées en parallèle. Cependant, si les données révélant des arbres positifs issues de la recherche doivent légalement être transmises au personnel assurant la surveillance officielle, aucune convention n'encadrait le partage des données de la surveillance officielle vers la recherche. Ces échanges reposaient sur une décision prise en COPIL, formalisée dans un compte rendu et validé par la DAAF, et sur le bon vouloir des deux parties. Ils ont fonctionné ainsi plusieurs années. Cela montre que sans plus de formalisation qu'une décision validée par les acteurs, les échanges peuvent exister entre la surveillance et la recherche.

2.3. La place de la recherche

L'un des freins qui peut exister à ces échanges est le Règlement général sur la protection des données (RGPD) (UE 2016/679). Depuis 2016, ce règlement légifère dans l'UE la gestion des données personnelles et notamment en ligne. Le but est de protéger les données personnelles mais aussi de sensibiliser les acteurs qui les traitent. Il a néanmoins rendu très compliqué l'utilisation de données géolocalisées dans un but de recherche. Or les données de surveillance en santé végétale rentrent dans cette catégorie dès l'instant où il est possible par le cadastre de relier une parcelle, une plante, un état sanitaire et le nom d'un propriétaire ou d'un exploitant. C'est à la charge de la personne manipulant les données de les protéger pour la sécurité de ces installations de sauvegarde mais aussi de les rendre anonymes par du bruit par exemple dans les coordonnées à la publication.

Une manière de débloquer cette situation serait de se procurer au préalable de la récolte de données, des accords signés des personnes concernées, mais cela rajoute une dimension administrative qui peut être un frein pour la recherche basée sur la télédétection. L'enjeu selon moi est d'arriver à impliquer le grand public dans la surveillance pour que l'utilisation et la remontée des données soient perçues comme acquises. Pour cela dans le cas de la surveillance du HLB à la Réunion, l'enjeu patrimonial de la préservation de la riche diversité en agrumes de l'île me paraît un bon angle de départ.

Tenter d'impliquer le plus large public possible dans la démarche de recherche nécessite un investissement pédagogique et dans la communication. La pandémie de COVID-19 en fournit un bon exemple. Certains se sont d'ailleurs intéressés aux initiatives nationales et internationales de récolte et d'analyses de données de surveillance pendant cette crise et à comment développer des indicateurs épidémiologiques communs afin de proposer des réponses unifiées en temps réel à échelle mondiale (Soubeyrand *et al*., 2020). Une fois ces données acquises et la prise de décisions de santé publique

adéquate, il est nécessaire que les dispositions à prendre doivent être comprises du grand public pour pouvoir être appliquées avec efficacité. La pandémie a révélé des difficultés dans la communication des mesures sanitaires et dans la compréhension des informations, produites notamment en littérature scientifique, par le grand public (Paakkari et Okan, 2020).

Dans cette optique de communication, nous avons développé en collaboration avec une statisticienne freelance une application R shiny. Elle a pour vocation d'aider à la communication entre les acteurs de la surveillance avec des cartes interactives sur le agrumes à la Réunion et le HLB (Fig.10). Il y a aussi un outil de simulation d'épidémies de HLB dans un parcellaire fictif avec des paramètres curseurs pour que l'utilisateur manipule le modèle.

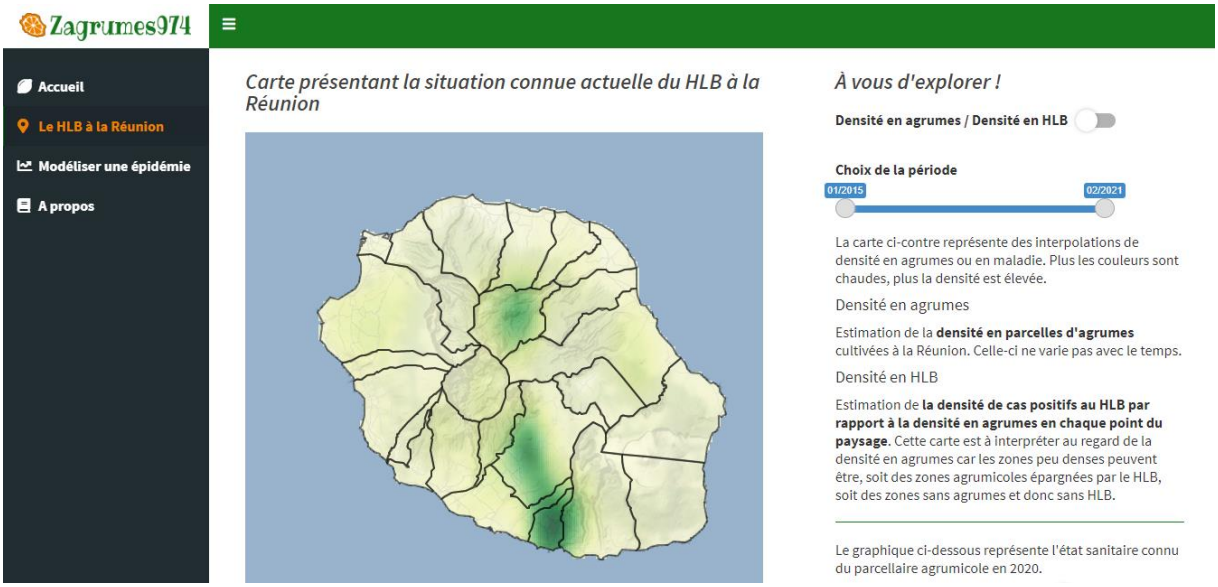


Figure 10 : Capture d'écran de l'application R shiny Zagrumes974 pour la communication autour du HLB à la Réunion en collaboration avec DoAna (https://rdrr.io/github/anna-doizy/zagrumes974/).

L'application peut aussi être utilisée par n'importe quel public, qui peut d'ailleurs trouver la description rapide de la maladie, des vecteurs et des dégâts occasionnés, avec des liens vers des approfondissements de connaissances. Une des évolutions possibles à donner à cet outil serait de s'inspirer de ceux disponibles sur la Plateforme ESV, comme par exemple sur le nématode du pin où le risque est ajouté à l'interactivité de la carte et peut amener à prendre des mesures prophylactiques.

Annexe

Annexe 1 : Fiche sanitaire HLB sur agrumes (recto et verso).

La maladie du Huanglongbing (HLB)

Qu'est ce que c'est ?

La maladie du HuangLongbing (HLB) ou greening des agrumes est causée par 3 espèces de la bactérie *Candidatus Liberibacter*, l'espèce *asiaticus*, *americanus* et *africanus*. **La maladie impacte toutes les variétés de *Citrus* (orange, pamplemousse, mandarine, etc.) et autres Rutaceae d'ornement (exemple : *Murraya paniculata* ou Rameau)**. De ce fait, elle fait partie des menaces les plus importantes pour les agrumes au niveau mondial. Dans les années 1990, ce ne sont pas moins de 60 millions d'arbres qui ont été détruit à l'échelle du globe. En 2016, elle est encore retrouvée en Amérique notamment au Brésil et en Floride mais aussi en Guadeloupe où depuis 2012 elle cause la perte presque totale de la production agrumicole. Elle est véhiculée par des insectes piqueurs suceurs, les psylles. Quelques piqûres leur suffisent pour transmettre la maladie, ce qui en fait des vecteurs très efficaces. **Il n'y a aucun traitement contre cette maladie. Seule, l'élimination des plants atteints permet d'éviter la réinfestation des plants sains.**



Dépérissements et chute prématurée des fruits et feuilles



Aspect marbré des feuilles et taches jaunes asymétriques

À quoi faut-il être attentif ?

La bactérie, contenue dans les vaisseaux conducteurs de sève, détourne les ressources de la plante causant des taches jaunes asymétriques sur les feuilles, **un aspect marbré** (taches vert-claires/jaunes et vert-foncé), une croissance très réduite des nouvelles feuilles et des racines. Les branches dépérissent et les jeunes pousses présentent un jaunissement avec des taches vert foncé. Les feuilles, mais aussi les fruits montrent une chute précoce. On constate une malformation et **une coloration partielle ou inversée des fruits** (la base du fruit reste verte), accompagnée d'une forte acidité/amertume (commercialisation difficile). Les arbres accusent un retard de croissance, une **perte de rendement significative** et une faible vigueur conduisant **inéluctablement à leur mort au bout de quelques années** (selon l'âge de l'arbre au moment de la contamination).



Forme dissymétrique des fruits (malformation)



Anomalie dans la coloration des fruits





Chlorose des feuilles avec taches vert foncé

Octobre 2016 - Auteurs et crédits photos :
Romuald Fontaine, FDGDON ; Gilles Cellier et Bruno Hostachy, Anses ; Antoine Franck, Cirad



Avec quoi peut-on la confondre ?

Les symptômes peuvent être confondus avec ceux provoqués par des carences, qui à l'inverse provoquent des motifs symétriques de part et d'autre de la nervure centrale. Les carences les plus fréquentes sont dues à un manque de magnésium, de zinc, de fer ou de manganèse. On peut observer également des décolorations des feuilles dues à l'utilisation d'herbicide.







Comment le HLB est il transmis ?

La maladie est transmise par les psylles, *Diaphorina citri* et *Tryoza erytreae*. À La Réunion, le plus fréquent est le psylle asiatique des agrumes (*D. citri*) qui se développe sur les Rutaceae cultivées (*Citrus*) mais aussi sur le Rameau (*Murraya paniculata*). Ils se développent rapidement et pullulent sur les jeunes pousses dont ils prélèvent la sève. Ils rejettent abondamment du miellat. Celui-ci se colle aux feuilles provoquant l'apparition de fumagine. Les larves acquièrent la bactérie en se nourrissant sur des arbres malades et la gardent toute leur vie. Dans deux cas sur trois, une seule piqûre permet de transmettre la maladie à la plante. Sur l'île, *D. citri* est controlé depuis 1978 par la microguêpe ectoparasitoïde : *Tamarixia radiata* dont le trou de sortie est caractéristique sur le thorax des larves parasitées.

Larves de *D. citri* (Liviidae)	Adulte de *D. citri* (Liviidae)	*T. radiata* (Eulophidae)
		
Taille : 0,3 mm à 1,6 mm 5 stades larvaires Rejet de miellat cireux Développement : 12 à 13 jours (25°c)	Taille : 2,7 à 3,3 mm de long Durée de vie : environ 50 jours Oeufs ancrés dans les jeunes tissus Plus de 800 oeufs par femelle Éclosion : 4 jours (25°c)	Taille : ~1 mm Durée de vie : 11 à 23 jours Parasite tous les stades larvaires 300 oeufs par femelle Développement : 11 jours (25°c)

En cas de suspicion, contacter la FDGDON au 0262452000 ou 0262499215. La DAAF, Service de l'Alimentation au 0262333668.

Références

Ajene, I.J., Khamis, F., Mohammed, S., Rasowo, B., Ombura, F.L., Pietersen, G., van Asch, B., Ekesi, S., 2019. First Report of Field Population of Trioza erytreae Carrying the Huanglongbing-Associated Pathogen, '*Candidatus* Liberibacter asiaticus', in Ethiopia. Plant Disease PDIS-01-19-0238-PDN. https://doi.org/10.1094/PDIS-01-19-0238-PDN

Anderson, P.K., Cunningham, A.A., Patel, N.G., Morales, F.J., Epstein, P.R., Daszak, P., 2004. Emerging infectious diseases of plants: pathogen pollution, climate change and agrotechnology drivers. Trends Ecol Evol 19, 535–544. https://doi.org/10.1016/j.tree.2004.07.021

ANSES_LSV_MA063_V2, 2021. https://www.anses.fr/en/system/files/ANSES_LSV_MA063_V2.pdf

Arrêté préfectoral N°2012-/1083/SG/DAAF. http://www.reunion.gouv.fr/IMG/pdf/2016-912.pdf

Aubert, B., 1988. Le greening, une maladie infectieuse des agrumes, d'origine bactérienne, transmise par des homoptères psyllidés : contribution à l'étude d'une stratégie de lutte appliquée au cas de l'île de la Réunion (thesis). CIRAD-IRFA, s.l.

Aubert, B., Grisoni, M., Villemin, M., & Rossolin, G. (1996). A case study of huanglongbing (greening) control in Reunion. In *International Organization of Citrus Virologists Conference Proceedings (1957-2010)* (Vol. 13, No. 13).

Aubert, B., & Quilici, S. (1984). Biological control of the African and Asian citrus psyllids (Homoptera: Psylloidea), through eulophid and encyrtid parasites (Hymenoptera: Chalcidoidea) in Reunion Island. In *International Organization of Citrus Virologists Conference Proceedings (1957-2010)* (Vol. 9, No. 9).

Baldi, P., La Porta, N., 2017. Xylella fastidiosa: Host Range and Advance in Molecular Identification Techniques. Frontiers in Plant Science 8.

Bassanezi, R.B., Busato, L.A., Filho, A.B., Amorim, L., Gottwald, T.R., 2005. Preliminary spatial pattern analysis of Huanglongbing in São Paulo, Brazil. International Organization of Citrus Virologists Conference Proceedings (1957-2010) 16. https://doi.org/10.5070/C576S629F9

Beloti, V.H., Alves, G.R., Coletta-Filho, H.D., Yamamoto, P.T., 2018. The Asian Citrus Psyllid Host Murraya koenigii Is Immune to Citrus Huanglongbing Pathogen '*Candidatus* Liberibacter asiaticus.' Phytopathology 108, 1089–1094. https://doi.org/10.1094/PHYTO-01-18-0012-R

Bulletin de Santé du Végétal, la Réunion, 2016. http://www.bsv-reunion.fr/?p=1980

Bussell, E.H., Cunniffe, N.J., 2020. Applying optimal control theory to a spatial simulation model of sudden oak death: ongoing surveillance protects tanoak while conserving biodiversity. Journal of The Royal Society Interface 17, 20190671. https://doi.org/10.1098/rsif.2019.0671

Capoor, S. P., D. G. Rao, and S. M. Visvanath, 1974. Greening disease of citrus in the Deccan Trap country and its relationship with the vector, Diaphorina citri Kuwayama, p. 43-49. In Proc. 6th Conf. IOCV, Univ. Calif., Div. Agr. Sci., Richmond.

Carlsson-Granér, U., Thrall, P.H., 2002. The spatial distribution of plant populations, disease dynamics and evolution of resistance. Oikos 97, 97–110. https://doi.org/10.1034/j.1600-0706.2002.970110.x

Cellier, G., Cruz, L., Sá Pereira, P., Andrade, E., Cubero, J., Redondo, C., Sabuquillo, P., Roselló, M., Devorshak, C., D'Onghia, A.M., Yaseen, T., Ince, E., Nilüfer, Y., Güler, P.G., 2019. Comparison of multiple real-time PCR & real-time LAMP detection methods for the plant pathogen "*Candidatus* Liberibacter" spp. causing the Huanglongbing disease on Citrus spp. (HLBVALID). Zenodo. https://doi.org/10.5281/zenodo.3243371

Cellier, G., Redondo, C., Cubero, J., Roselló, M., de Andrade, E., Cruz, L., Ince, E., Yildiz, H.N., Güler, P.G., D'Onghia, A.M., Yaseen, T., Djelouah, K., Metz-Verschure, E., Gaffuri, F., Gottsberger, R.A., Giovani, B., 2020. Comparison of the performance of the main real-time and conventional PCR detection tests for '*Candidatus* Liberibacter' spp., plant pathogenic bacteria causing the Huanglongbing disease in Citrus spp. Eur J Plant Pathol 157, 919–941. https://doi.org/10.1007/s10658-020-02052-3

Choi, C.W., Hyun, J.W., Hwang, R.Y., Powell, C.A., 2018. Loop-mediated Isothermal Amplification assay for Detection of *Candidatus* Liberibacter Asiaticus, a Causal Agent of Citrus Huanglongbing. Plant Pathol J 34, 499–505. https://doi.org/10.5423/PPJ.FT.10.2018.0212

Cunniffe, N.J., Koskella, B., E. Metcalf, C.J., Parnell, S., Gottwald, T.R., Gilligan, C.A., 2015. Thirteen challenges in modelling plant diseases. Epidemics, Challenges in Modelling Infectious DIsease Dynamics 10, 6–10. https://doi.org/10.1016/j.epidem.2014.06.002

DAAF Réunion Agreste, 2019. https://daaf.reunion.agriculture.gouv.fr/

Damsteegt, V.D., Postnikova, E.N., Stone, A.L., Kuhlmann, M., Wilson, C., Sechler, A., Schaad, N.W., Brlansky, R.H., Schneider, W.L., 2010. Murraya paniculata and Related Species as Potential Hosts and Inoculum Reservoirs of '*Candidatus* Liberibacter asiaticus', Causal Agent of Huanglongbing. Plant Disease 94, 528–533. https://doi.org/10.1094/PDIS-94-5-0528

DGAL/SDSPV/2021-807, 2021. https://info.agriculture.gouv.fr/gedei/site/bo-agri/instruction-2021-807

DGAL, 2018. Convention cadre, 2018-121. Convention cadre portant définition et organisation de la Plateforme nationale d'épidémiosurveillance en santé végétale.

Dupré, M., Michels, T., Le Gal, P.-Y., 2017. Diverse dynamics in agroecological transitions on fruit tree farms. European Journal of Agronomy 90, 23–33. https://doi.org/10.1016/j.eja.2017.07.002

Dupuy, S., Gaetano, R., Le Mézo, L., 2020. Mapping land cover on Reunion Island in 2017 using satellite imagery and geospatial ground data. Data in Brief 28, 104934. https://doi.org/10.1016/j.dib.2019.104934

EPPO Reporting Service n°08, 2020/164. https://gd.eppo.int/reporting/article-6842

Gibbs, E.P.J., 2014. The evolution of One Health: a decade of progress and challenges for the future. Veterinary Record 174, 85–91. https://doi.org/10.1136/vr.g143

Gilligan, C.A., van den Bosch, F., 2008. Epidemiological Models for Invasion and Persistence of Pathogens. Annual Review of Phytopathology 46, 385–418. https://doi.org/10.1146/annurev.phyto.45.062806.094357

Gottwald, T., Poole, G., McCollum, T., Hall, D., Hartung, J., Bai, J., Luo, W., Posny, D., Duan, Y.-P., Taylor, E., da Graça, J., Polek, M., Louws, F., Schneider, W., 2020. Canine olfactory detection of a vectored phytobacterial pathogen, Liberibacter asiaticus, and integration with disease control. Proceedings of the National Academy of Sciences 117, 3492–3501. https://doi.org/10.1073/pnas.1914296117

Gottwald, T.R., 1989. Preliminary Analysis of Citrus Greening (Huanglungbin) Epidemics in the People's Republic of China and French Reunion Island. Phytopathology 79, 687. https://doi.org/10.1094/Phyto-79-687

Hashim, I. (2012). South American leaf blight (Microcyclus ulei) of hevea rubber. *Protection against South American Leaf Blight of Rubber in Asia and the Pacific Region; FAO: Bangkok, Thailand*, *2*, 21-133.

Hendrikx, P., Gay, E., Chazel, M., Moutou, F., Danan, C., Richomme, C., Boue, F., Souillard, R., Gauchard, F., Dufour, B., 2011. OASIS: an assessment tool of epidemiological surveillance systems in animal health and food safety. Epidemiology & Infection 139, 1486–1496. https://doi.org/10.1017/S0950268811000161

Heng, T.S., Joo, G.K., 2017. Rubber, in: Thomas, B., Murray, B.G., Murphy, D.J. (Eds.), Encyclopedia of Applied Plant Sciences (Second Edition). Academic Press, Oxford, pp. 402–409. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-394807-6.00175-1

Hodges, A.W., Spreen, T.H., n.d. Economic Impacts of Citrus Greening (HLB) in Florida, 6.

Janse, J.D., Obradovic, A., 2010. XYLELLA FASTIDIOSA: ITS BIOLOGY, DIAGNOSIS, CONTROL AND RISKS. Journal of Plant Pathology 92, S35–S48.

Kuyek, D., 2000. Blast, biotech and big business: implications of corporate strategies on rice research in Asia. GRAIN.

Last, J.M., 2001. RE: "A DICTIONARY OF EPIDEMIOLOGY, FOURTH EDITION, EDITED BY JOHN M. LAST, ROBERT A. SPASOFF, AND SUSAN G. HARRIS." American Journal of Epidemiology 154, 389–389. https://doi.org/10.1093/aje/154.4.389

Lewis-Rosenblum, H., Martini, X., Tiwari, S., Stelinski, L.L., 2015. Seasonal Movement Patterns and Long-Range Dispersal of Asian Citrus Psyllid in Florida Citrus. Journal of Economic Entomology 108, 3–10. https://doi.org/10.1093/jee/tou008

Lieberei, R., 2007. South American Leaf Blight of the Rubber Tree (Hevea spp.): New Steps in Plant Domestication using Physiological Features and Molecular Markers. Annals of Botany 100, 1125. https://doi.org/10.1093/aob/mcm133

Lin, K. H., 1956. Yellow shoot of citrus. [In Chinese]. Acta Phylopathologica Sinica, 2, 1-42.

Martinetti, D., Soubeyrand, S., 2018. Identifying Lookouts for Epidemio-Surveillance: Application to the Emergence of Xylella fastidiosa in France. Phytopathology 109, 265–276. https://doi.org/10.1094/PHYTO-07-18-0237-FI

Martínez Sánchez, L., Scholten, R., Navas Cortés, J.A., Zarco-Tejada, P.J., Beck, P.S.A., 2019. Monitoring the impact of Xylella on Apulia's olive orchards using Sentinel-2 satellite data and aerial photographs.

Martini, X., Rivera, M., Hoyte, A., Sétamou, M., Stelinski, L., 2018. Effects of Wind, Temperature, and Barometric Pressure on Asian Citrus Psyllid (Hemiptera: Liviidae) flight behavior. J Econ Entomol 111, 2570–2577. https://doi.org/10.1093/jee/toy241

Méthode Officielle d'Analyse 033 version 1b, Anses, 2014.

Miles, G.P., Stover, E., Ramadugu, C., Keremane, M.L., Lee, R.F., 2017. Apparent Tolerance to Huanglongbing in Citrus and Citrus-related Germplasm. HortScience 52, 31–39. https://doi.org/10.21273/HORTSCI11374-16

Moran, V.C., 1968. The development of the citrus psylla, Trioza erytreae (Del Guercio) (Homoptera: Psyllidae), on Citrus lemon and four indigenous host plants. Journal of the Entomological Society of Southern Africa 31, 391–402. https://doi.org/10.10520/AJA00128789_3112

Oerke, E.-C., 1999. CHAPTER 3 - Estimated crop losses due to pathogens, animal pests and weeds, in: Oerke, E-C., Dehne, H.-W., Schönbeck, F., Weber, A. (Eds.), Crop Production and Crop Protection. Elsevier, Amsterdam, pp. 72–741. https://doi.org/10.1016/B978-0-444-82095-2.50009-9

One Health High-Level Expert Panel Annual Report 2021 https://www.who.int/publications/m/item/one-health-high-level-expert-panel-annual-report-2021 (accessed 5.2.22).

Paakkari, L., Okan, O., 2020. COVID-19: health literacy is an underestimated problem. Lancet Public Health 5, e249–e250. https://doi.org/10.1016/S2468-2667(20)30086-4

Parnell, S., Gottwald, T.R., Gilks, W.R., van den Bosch, F., 2012. Estimating the incidence of an epidemic when it is first discovered and the design of early detection monitoring. Journal of Theoretical Biology 305, 30–36. https://doi.org/10.1016/j.jtbi.2012.03.009

Parnell, S., Gottwald, T.R., Riley, T., Bosch, F. van den, 2014. A generic risk-based surveying method for invading plant pathogens. Ecological Applications 24, 779–790. https://doi.org/10.1890/13-0704.1

Parnell, S., van den Bosch, F., Gottwald, T., Gilligan, C.A., 2017. Surveillance to Inform Control of Emerging Plant Diseases: An Epidemiological Perspective. Annual Review of Phytopathology 55, 591–610. https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-080516-035334

Picard, C., Soubeyrand, S., Jacquot, E., Thébaud, G., 2019. Analyzing the Influence of Landscape Aggregation on Disease Spread to Improve Management Strategies. Phytopathology® 109, 1198–1207. https://doi.org/10.1094/PHYTO-05-18-0165-R

Purcell, A., 2013. Paradigms: examples from the bacterium Xylella fastidiosa. Annu Rev Phytopathol 51, 339–356. https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-082712-102325

Rapport expertise collective Anses, 2019. https://www.anses.fr/fr/system/files/SANTVEG2016SA0235Ra.pdf?download=1

Règlement (UE) 2016/679 du Parlement européen et du Conseil du 27 avril 2016, relatif à la protection des personnes physiques à l'égard du traitement des données à caractère personnel et à la libre circulation de ces données, et abrogeant la directive 95/46/CE (règlement général sur la protection des données).

Règlement (UE) 2016/2031 du Parlement européen et du Conseil du 26 octobre 2016 relatif aux mesures de protection contre les organismes nuisibles aux végétaux, modifiant les règlements du Parlement européen et du Conseil (UE) n° 228/2013, (UE) n° 652/2014 et (UE) n° 1143/2014 et abrogeant les directives du Conseil 69/464/CEE, 74/647/CEE, 93/85/CEE, 98/57/CE, 2000/29/CE, 2006/91/CE et 2007/33/CE, 2016. , OJ L.

Rimbaud, L., Bruchou, C., Dallot, S., Pleydell, D.R.J., Jacquot, E., Soubeyrand, S., Thébaud, G., n.d. Using sensitivity analysis to identify key factors for the propagation of a plant epidemic. Royal Society Open Science 5, 171435. https://doi.org/10.1098/rsos.171435

Rimbaud, L., Dallot, S., Bruchou, C., Thoyer, S., Jacquot, E., Soubeyrand, S., Thébaud, G., 2019. Improving Management Strategies of Plant Diseases Using Sequential Sensitivity Analyses. Phytopathology® 109, 1184–1197. https://doi.org/10.1094/PHYTO-06-18-0196-R

Rimbaud, L., Papaïx, J., Rey, J.-F., Barrett, L.G., Thrall, P.H., 2018. Assessing the durability and efficiency of landscape-based strategies to deploy plant resistance to pathogens. PLOS Computational Biology 14, e1006067. https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1006067

Sauvion, N., n.d. Taxonomie, distribution géographique, spécificité d'interaction insecte-plante-pathogène 57.

Schneider, K., van der Werf, W., Cendoya, M., Mourits, M., Navas-Cortés, J.A., Vicent, A., Oude Lansink, A., 2020. Impact of Xylella fastidiosa subspecies pauca in European olives. Proceedings of the National Academy of Sciences 117, 9250–9259. https://doi.org/10.1073/pnas.1912206117

Sechler, A., Schuenzel, E.L., Cooke, P., Donnua, S., Thaveechai, N., Postnikova, E., Stone, A.L., Schneider, W.L., Damsteegt, V.D., Schaad, N.W., 2009. Cultivation of ' *Candidatus* Liberibacter asiaticus', ' *Ca.* L. africanus', and ' *Ca.* L. americanus' Associated with Huanglongbing. Phytopathology 99, 480–486. https://doi.org/10.1094/PHYTO-99-5-0480

Sétamou, M., Sanchez, A., Patt, J.M., Nelson, S.D., Jifon, J., Louzada, E.S., 2012. Diurnal Patterns of Flight Activity and Effects of Light on Host Finding Behavior of the Asian Citrus Psyllid. Journal of Insect Behavior 25, 264–276. https://doi.org/10.1007/s10905-011-9295-3

Singhal, T., 2020. A Review of Coronavirus Disease-2019 (COVID-19). Indian J Pediatr 87, 281–286. https://doi.org/10.1007/s12098-020-03263-6

Sivager, G., Calvez, L., Heuget, B., Bruyère, S., Boisne-Noc, R.V., Brat, P., Gros, O., Ollitraut, P., Morillon, R., 2019. Triploid lime is more tolerant to HLB than diploid lime because specific physiological and anatomical traits associated to better detoxification processes. Presented at the Caribbean Science and Innovation Meeting 2019.

Sorin, E., 2020. Amélioration de la surveillance épidémiologique du « greening » des agrumes infectés par le Huanglongbing à La Réunion par Spectroscopie Proche InfraRouge. Encadrement : Virginie Ravigné, Olivier Pruvost, Karine Boyer, Ismaël Houillon.

Soubeyrand, S., Demongeot, J., Roques, L., 2020. Towards unified and real-time analyses of outbreaks at country-level during pandemics. One Health 11, 100187. https://doi.org/10.1016/j.onehlt.2020.100187

Tomaseto, A.F., Krugner, R., Lopes, J.R.S., 2016. Effect of plant barriers and citrus leaf age on dispersal of Diaphorina citri (Hemiptera: Liviidae). Journal of Applied Entomology 140, 91–102. https://doi.org/10.1111/jen.12249

Tomlinson, I., Potter, C., 2010. 'Too little, too late'? Science, policy and Dutch Elm Disease in the UK. Journal of Historical Geography 36, 121–131. https://doi.org/10.1016/j.jhg.2009.07.003

Walter, A.J., Duan, Y., Hall, D.G., 2012. Titers of 'Ca. Liberibacter asiaticus' in Murraya paniculata and Murraya-reared Diaphorina citri Are Much Lower than in Citrus and Citrus-reared Psyllids. HortScience 47, 1449–1452. https://doi.org/10.21273/HORTSCI.47.10.1449

Yudelman, M., Ratta, A., Nygaard, D.F., 1998. Pest Management and Food Production: Looking to the Future. Intl Food Policy Res Inst.

Abstract

Plant disease surveillance is a major food safety issue. Although surveillance methods have been greatly improved in the last decade, especially with risk-based surveillance, implementing effective surveillance is not obvious in some regions. Reunion Island is an excellent example of such territories where organizing plant disease surveillance is a challenge due to its position as a DROM, with a very heterogeneous landscape and limited resources. Since 2012, Huanglongbing (HLB), caused by the bacterium *Candidatus* Liberibacter, is re-emerging in citrus orchards in Reunion Island and the state services have to organize the surveillance of a fragmented, heterogeneous citrus landscape and this taking into account local policies. We will show here the methods developed to improve the knowledge of the landscape, and thus better understand the potential epidemiological pathways. The approach of photo-interpretation of satellite images and field confirmation has allowed to consolidate the existing incomplete database. We will also show how risk-based surveillance can guide sampling. In the context of HLB surveillance in Reunion, a list of the most connected orchards was used to target sampling of areas most likely to be epidemiological nodes. We were able to show through learning algorithms that elevation and connectivity are variables of major importance in explaining the health status of citrus. Furthermore, the involvement of home gardens in the epidemic was highlighted, supporting the fact that the surveillance of the agricultural compartment alone was not sufficient. An evaluation of the surveillance system was also carried out using the OASIS method. This allowed us to highlight the good functioning of the core of the surveillance chain, despite the fact that positions in the central organization need to be defined and communication with the general public needs to be improved.

Résumé

La surveillance des maladies de plantes est un enjeu majeur de la sécurité alimentaire. Bien que les méthodes de surveillance aient été grandement améliorées au cours de la dernière décennie, notamment avec la surveillance basée sur le risque, mettre en place une surveillance efficace n'est pas évident dans certaines régions. La Réunion est un excellent exemple de ces territoires où l'organisation de la surveillance des maladies des plantes est un défi en raison de sa position de DROM, avec un paysage très hétérogène et de faibles ressources. Depuis 2012, le Huanglongbing (HLB), causé par la bactérie *Candidatus* Liberibacter, est en réémergence dans les vergers d'agrumes de la Réunion et les services de l'État doivent organiser la surveillance d'un parcellaire agrumicole fragmenté, hétérogène et ce en tenant compte des politiques locales. Nous montrerons ici les méthodes développées pour améliorer la connaissance de la parcelle, et ainsi mieux comprendre les voies épidémiologiques potentielles. L'approche de photo-interprétation d'images satellites et de confirmation sur le terrain a permis de consolider la base de données incomplète existante. Nous montrerons également comment la surveillance basée sur le risque peut guider l'échantillonnage. Dans le cadre de la surveillance du HLB à la Réunion, une liste des parcelles les plus connectées a été utilisée pour cibler l'échantillonnage des zones les plus susceptibles d'être des nœuds épidémiologiques. Nous avons pu montrer grâce à des algorithmes d'apprentissage que l'altitude et la connectivité sont des variables d'importance majeure pour expliquer l'état de santé des agrumes. De plus, l'implication des jardins des particuliers dans l'épidémie a été mise en évidence, appuyant le fait que la seule surveillance du compartiment agricole n'était pas suffisante. Une évaluation du système de surveillance a également été réalisée en utilisant la méthode OASIS. Cela nous a permis de mettre en lumière le bon fonctionnement du noyau de la chaine de surveillance malgré des prises de positions dans l'organisation centrale à définir et une communication auprès du grand public qui reste à améliorer.