

RAPPORT DE STAGE

Présenté par : GUILLOTEAU Camille

Dans le cadre d'un Certificat d'Expérience à l'International

Stage effectué du : 01/02/2018 au 27/07/2018

Au :

CIRAD-Centre de coopération Internationale en recherche agronomique pour le développement
Pôle de Protection des Plantes
7 chemin de l'Irat
Ligne Paradis
97410 Saint Pierre-La Réunion

Sur le thème :

Utilisation de la connaissance du paysage agricole pour l'accompagnement des réseaux d'épidémio-surveillance : application au greening des agrumes à la Réunion

Eventuellement : rapport confidentiel : ☐ Date d'expiration de confidentialité :

Résumé-Abstract

Le Huanglongbing (HLB) est une maladie bactérienne causant le dépérissement des agrumes et transmise essentiellement par des psylles. Elle ré-émerge sur l'île de la Réunion depuis 2012 et menace 200 à 300 ha de vergers. Contrairement aux paysages agrumicoles industriels sur lesquels des stratégies de surveillance et de gestion ont été établies, le parcellaire local est très morcelé et hétérogène. Ce travail vise donc à explorer comment on peut améliorer la surveillance et la gestion de cette maladie en prenant mieux en compte la structure du paysage agrumicole. Pour cela, la description du parcellaire a été améliorée grâce à la fusion de cinq bases de données existantes et des prospections réalisées sur le terrain. Le krigeage peut ensuite être utilisé pour compléter les données manquantes. La connectivité entre les parcelles d'agrumes a par la suite été évaluée à l'aide de divers indices. Nos analyses identifient une zone très connectée correspondant à la commune de Petite-Ile, comportant plus d'un quart des parcelles agrumicoles de l'île. A l'inverse, les parcelles situées sur la commune de Saint-Paul apparaissent plus isolées et pourront constituer une zone propice au développement futur de l'agrumiculture. Par ailleurs, les données de présence/absence du HLB mettent en évidence un seuil aux environs de 750 m d'altitude au-delà duquel le HLB est moins présent. Ces premiers résultats pourront être affinés avec des connaissances plus approfondies sur la biologie du vecteur.

Mots-clés : agrumes, altitude, connectivité, HLB, parcellaire, psylles, Réunion, épidémiologie

Huanglongbing (HLB) is a destructive disease of citrus which vectors are psyllids. It has been reemerging in Reunion island since 2012, threatening 200 to 300 hectares of citrus groves. Citrus plots are small but numerous. The aim of this work is to show if considering landscape features enables a better surveillance and management of HLB. To do so, we first combined the five existing databases and do surveys on the field to supplement the database. Kriging can be used to estimate the land-use of non-visible plots. Connectivity between citrus plots was then assessed with various indices. The main area of production corresponds to the municipality of Petite-Ile and has strongly connected plots. On the contrary, Saint-Paul municipality is a more isolated area. The planting of citrus trees there may be safer than in more connected areas. Statistical models using detections of HLB show a diminution of incidence above 750 metres. However, knowledge about HLB vectors is poor and complementary data would allow to go deeper into connectivity assessment and to model the spread of the disease.

Keywords: citrus, connectivity, elevation, HLB, plots of land, psyllids, Reunion island, epidemiology

Remerciements

Je tiens à remercier chaleureusement toutes les personnes qui ont contribué au bon déroulement de ce stage :

-le Cirad, l'équipe du 3P de Saint-Pierre et son directeur Bernard REYNAUD pour m'avoir accueillie en stage dans leur structure et en particulier les agents de l'UMR PVBMT (Unité Mixte de Recherche Peuplements Végétaux et Bioagresseurs en Milieux Tropicaux) et Olivier PRUVOST, responsable de l'équipe « Génomique et épidémiologie des agents pathogènes émergents » ;

-Virginie RAVIGNE, ma maître de stage pour son encadrement, sa gentillesse et sa disponibilité, ses relectures attentives et pour tout faire pour que ses stagiaires travaillent dans de bonnes conditions. Merci aussi pour toutes les discussions intéressantes sur le monde de la recherche (et autres !) ;

-Corentin EXBRAYAT, en stage de L3 professionnelle avec qui j'ai effectué les sorties terrains et la chasse aux agrumes (parfois mobiles ou recouverts !). Bravo pour tes nombreux demi-tours réalisés avec brio en toutes circonstances et pour avoir déniché la plus belle des vues pour un pic-nic ! ;

-Frédéric CHIROLEU, chercheur en biostatistiques et Anna DOIZY, en volontariat service civique, pour leur aide à la réalisation du krigeage et des GLM ;

-Stéphane DUPUY, chercheur à l'UMR TETIS pour le prêt de la tablette qui a révolutionné nos journées terrain et les renseignements sur la télédétection ;

-La FDGDON et en particulier Estelle ROUX et Romuald FONTAINE pour nous avoir permis de les accompagner sur le terrain et pour nous avoir fourni les résultats des détections du HLB ;

-Pascal DEGENNE et Danny LO SEEN, chercheurs Cirad, pour avoir organisé la formation Ocelet à laquelle j'ai eu le plaisir de participer ;

-René-Claude JUDITH, technicien, et Vivien KLEINPETER, en volontariat service civique, pour avoir pris le temps de nous communiquer leurs données sur le parcellaire agrumicole ;

-les autres stagiaires pour leur compagnie, les fruits tropicaux et les carrés de chocolat réconfortants, les post-its qui ont égayé mon bureau et pour avoir souligné mes progrès en coloriage sur QGIS !

Table des matières

Résumé-Abstract.....	
Remerciements	
Introduction	1
1) Matériel et Méthodes	5
1.1) Le HLB à la Réunion.....	5
1.1.1) Généralités sur le HLB.....	5
1.1.2) La réémergence du HLB à la Réunion	7
1.1.3) Les organismes chargés de la gestion du HLB à la Réunion.....	8
1.1.4) Surveillance et gestion du HLB à la Réunion.....	9
1.1.5) Les bases de données existantes	9
1.2) Amélioration de la connaissance du parcellaire agrumicole	10
1.2.1) Synthèse des données existantes	10
1.2.2) Prospections sur le terrain	11
1.2.3) Extrapolation par krigeage.....	12
1.3) Analyse de la structure spatiale du paysage agrumicole	13
1.3.1) Répartition géographique des surfaces agrumicoles.....	13
1.3.2) Evaluation de la connectivité du paysage avec différents indices.....	13
1.4) Effet du paysage sur la répartition de la maladie	14
1.4.1) Lien entre l'altitude et la présence/absence de maladie	14
1.5) Premières simulations sur Ocelet	15
2) Résultats.....	16
2.1) Première description du parcellaire à partir de la fusion des bases de données initiales	16
2.1.1) Production d'une synthèse des données géographiques disponibles.....	16
2.1.2) Première description du parcellaire à partir de la base de données initiale.....	17
2.1.3) Importance du choix du tracé dans le calcul des superficies.....	20
2.2) Amélioration de la précision du parcellaire grâce aux prospections sur le terrain	21
2.2.1) Effort d'échantillonnage	21
2.2.2) Correspondance entre les renseignements des bases de données initiales et les prospections réalisées	24
2.2.3) Apports potentiels du krigeage.....	26
2.3) Indices de connectivité	27
2.3.1) Groupes de parcelles selon les distances seuil	27
2.3.2) Indice de la somme des inverses des distances (C)	28
2.3.3) Indice des surfaces d'agrumes situées dans une zone tampon (T)	29

2.3.4) Indice de connectivité potentielle (PC).....	30
2.4) Relation entre altitude et présence de la maladie sur la commune de Petite-Ile.....	32
3) Discussion.....	34
3.1) Vers une meilleure connaissance du paysage agrumicole	34
3.1.1) Avancées réalisées et perspectives.....	34
3.1.1) Limites concernant la méthodologie de réalisation de la base de données	35
3.1.2) Mieux comprendre la structure du paysage en intégrant de nouvelles données....	36
3.1.3) Affiner les estimations de connectivité par une meilleure prise en compte des capacités de dispersion des vecteurs	36
3.1.4) Liens entre l'altitude et la présence du HLB : quel zonage adopter ?	38
3.2) La gestion du HLB à la Réunion	38
3.2.1) Interactions entre les acteurs	38
3.2.2) Perspectives	39
Conclusion	39
Abréviations-sigles	40
Bibliographie	40
Sources des images	42
Annexes.....	43

Liste des figures

- Figure 1 : Exemple de schéma d'un modèle compartimental
- Figure 2 : Feuilles et fruits de combava et tangor
- Figure 3 : Symptômes du HLB sur flush, feuilles, fruit et arbre au Tampon
- Figure 4 : *Murraya paniculata*, *Diaphorina citri*, *Trioza erytreae*.
- Figure 5 : Carte de répartition des deux espèces de psylles à la Réunion
- Figure 6 : Carte présentant les zones prospectées sur le terrain
- Figure 7 : Formule du modèle log-logistique retenu
- Figure 8 : Exemple de tracés de parcelles différents pour deux bases de données
- Figure 9 : Carte de localisation des vergers d'agrumes selon la base de données initiale
- Figure 10 : Superficies de vergers par communes d'après la base de données initiale
- Figure 11 : Distribution des superficies des vergers d'agrumes d'après la base de données initiale
- Figure 12 : Carte des parcelles de vergers d'agrumes de la commune de Petite-Ile.
- Figure 13 : Distribution des distances entre les parcelles d'agrumes référencées dans la base de données initiale
- Figure 14 : Superficies des parcelles communes à toutes les bases de données, selon celle considérée
- Figure 15 : Distribution des superficies de parcelles d'agrumes selon le type de tracé
- Figure 16 : Carte de localisation des parcelles prospectées sur le terrain et le type de culture qui y a été observé
- Figure 17 : Superficies d'agrumes par communes, avant et après vérification sur le terrain
- Figure 18 : Carte des parcelles d'agrumes ajoutées grâce aux prospections autour de Piton Hyacinthe
- Figure 19 : Surfaces de vergers selon les types renseignés dans la base de données et observés sur le terrain
- Figure 20 : Position des centroïdes des parcelles prospectées au Tampon, avant et après krigeage

Figure 21 : Schéma des groupes de parcelles formés pour une distance seuil de 7.5 km et 10 km
 Figure 22 : Nombre de groupes de parcelles d'agrumes en fonction de la distance seuil entre les parcelles
 Figure 23 : Cartes des centroides des parcelles d'agrumes selon la valeur de la somme des inverses des distances.
 Figure 24 : Cartes de répartition des valeurs de T en fonction de la distance seuil considérée
 Figure 25 : Schéma présentant le biais que peut provoquer la forme de l'île sur le calcul de l'indice de connectivité T
 Figure 26 : Carte des centroides des parcelles d'agrumes selon leur indice de connectivité PC prenant en compte un kernel de dispersion
 Figure 27 : Distribution des valeurs de PC des parcelles d'agrumes
 Figure 28 : Carte des 50 centroides de parcelles avec les plus forts indices de PC
 Figure 29 : Graphique des observations et des modèles testés pour étudier la présence de la maladie en fonction de l'altitude sur la commune de Petite-Ile
 Figure 30 : paramètres du modèle retenu et leurs intervalles de confiance
 Figure 31 : Carte montrant les détections du HLB sur une exploitation de Salazie et l'indice de connectivité PC des parcelles
 Figure 32 : Probabilités de dispersion selon la distance pour plusieurs valeurs de α

Liste des tableaux

Tableau 1 : Caractéristiques des bases de données disponibles en début de stage et de celle obtenue à l'issue de leur fusion
 Tableau 2 : Précision des bases de données initiales indiquant des parcelles d'agrumes
 Tableau 3 : Surfaces totales et estimées par le krigeage, en ha et par type de verger
 Tableau 4 : Caractéristiques des différents modèles testés

Liste des annexes

Annexe 1 : Cartes topographique et des précipitations sur l'île de la Réunion
 Figure a.1 : Carte des courbes d'altitude de l'île de la Réunion
 Figure a.2 : Carte des médianes des précipitations sur l'île de la Réunion
 Annexe 2 : Exemples de photo-interprétation
 Figure a.3 : Différents aspects que peuvent présenter les vergers d'agrumes sur les images satellites.
 Figure a.4 : Comparaison des aspects que peuvent présenter les vergers d'agrumes et de mangue sur les images satellites.
 Figure a.5 : Exemple de vergers de mangues âgés pouvant être confondu avec de la forêt sur les images satellites.
 Annexe 3 : Champs de la table attributaire de la base de données, le type et les valeurs prises par les différents champs et leur signification
 Annexe 4 : Superficies de vergers d'agrumes par commune d'après la base de données initiale
 Annexe 5 : Détections du HLB et connectivité des parcelles à Petite-Ile
 Annexe 6 : Environnement de travail Ocelet
 Annexe 7 : Exemple de captures d'écran des résultats de simulations Ocelet, ouverts sous Google Earth
 Figure a.6 : Groupes de parcelles distantes de moins de 500 mètres.
 Figure a.7 : Surfaces d'agrumes dans un rayon de 500 m autour de chaque parcelle à Petite Ile, avec et sans les liens.
 Figure a.8 : Simulation de propagation d'une épidémie entre les parcelles d'agrumes de Petite-Ile
 Annexe 8 : Scripts Ocelet

Introduction

Aujourd'hui, l'augmentation des échanges entre les différentes régions du monde tout comme les changements climatiques créent un contexte favorable à la propagation de nouvelles épidémies de maladies infectieuses. L'épidémiologie, discipline qui étudie la fréquence et la répartition des problèmes de santé au sein des populations dans le temps et l'espace ainsi que les facteurs qui les déterminent, présente alors un intérêt accru.

Les modèles compartimentaux, initialement développés par Kermack et McKendrick (1991) sont classiquement utilisés pour comprendre comment une maladie se propage dans une population. Des variations existent selon les modèles mais couramment, on modélise l'évolution de groupes d'individus sains (noté S), exposés (E), infectés (I) et décédés (D) en fonction de conditions initiales et des taux de transferts entre ces différents groupes (figure 1).

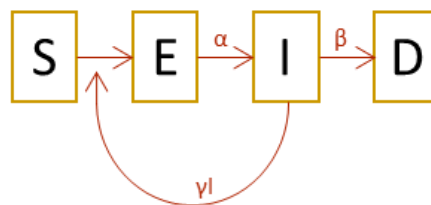


Figure 1 : Exemple de schéma d'un modèle compartimental.

Les rectangles représentent des groupes ou classes d'individus. S : sains et susceptibles d'être infectés ; E : infectés mais non encore infectieux ; I : infectés ; D : décédés. Les flèches représentent les taux de transfert entre les classes : α : taux d'individus infectés qui deviennent infectieux par unité de temps ; β : taux d'individus infectieux qui décèdent (et sont retirés du modèle) par unité de temps ; γ : proportion de contacts entre sains et infectés qui donnent lieu à une infection par unité de temps

L'épidémiologie a permis de mieux comprendre les dynamiques parfois complexes des épidémies. Par exemple, les modèles compartimentaux font généralement ressortir un taux reproductif de base, appelé R_0 , qui correspond au nombre de nouvelles infections causées par une unique infection initiale. Cette quantité est très importante car elle détermine si une épidémie se répand ($R_0 > 1$) ou s'éteint ($R_0 < 1$). Le R_0 est fonction des paramètres de transmission de la maladie et des caractéristiques de la population touchée (natalité, mortalité...). Il indique comment chacun de ces paramètres affecte le devenir d'une épidémie. Ainsi, l'épidémiologie peut également déboucher sur des applications concrètes pour la lutte contre la propagation des maladies. Par exemple, pour les maladies infantiles, le R_0 est proportionnel à la quantité d'hôtes sains susceptibles d'être infectés. Lorsque la couverture vaccinale (la proportion d'individus vaccinés) augmente, le R_0 diminue. On peut ainsi calculer la couverture vaccinale à atteindre pour éradiquer une maladie, c'est-à-dire faire passer le R_0 sous le seuil de 1. Dans le domaine végétal, ces modèles ont permis, par exemple, de montrer que la lutte contre une maladie bactérienne systémique des agrumes, passait par l'arrachage des arbres malades et de tous leurs voisins sur un certain rayon. Des rayons d'arrachage optimaux autour d'arbres infectés ont même été calculés (Cunniffe *et al.*, 2015). Les travaux en épidémiologie peuvent également permettre une surveillance plus efficace, en basant l'effort d'échantillonnage sur des évaluations de risque (Cameron, 2012; Parnell *et al.*, 2017) et donc aider à l'élaboration de plans de gestion des bioagresseurs de cultures.

Néanmoins, une des hypothèses de base de ces modèles est que la population hôte est bien mélangée, de sorte que les taux de transmission entre classes sont proportionnels aux effectifs de chaque classe et que les probabilités de contamination entre individus sont indépendantes de la position des individus dans l'espace. Cette hypothèse est raisonnable pour de nombreuses applications en épidémiologie humaine et animale, mais probablement limitante concernant la propagation des pathologies végétales. En effet, pour ces maladies, les hôtes (des plantes) sont fixes et intégrés dans un paysage. Certains paysages agricoles peuvent être relativement uniformes, notamment dans le cas de systèmes intensifs avec des monocultures sur des parcelles de grande taille et donc satisfaire en partie cette hypothèse de répartition homogène de la population hôte. D'autres paysages, plus complexes, rendent encore plus limitante cette hypothèse. C'est notamment le cas des agrosystèmes dits « traditionnels ». Ces paysages, présents dans les pays en voie de développement et dans les régions ultramarines françaises, sont caractérisés par des parcelles et des surfaces totales de petites tailles ainsi que par de fortes hétérogénéités du point de vue des pratiques agricoles et parfois du point de vue éco-climatique. Considérant ces particularités, on peut s'attendre à ce que la stochasticité y joue un rôle plus fort que dans des systèmes intensifs.

Par ailleurs, les niches écologiques des pathogènes sont liées aux caractéristiques du paysage. En effet, les conditions physiques (température, humidité...) variant selon des paramètres tels que le relief, l'orientation ou l'occupation du sol, les pathogènes et les vecteurs pourront ou non s'établir dans les différentes parties d'un paysage. Par exemple, les travaux de Soti *et al.* (2013) montrent que pour la fièvre de la vallée du Rift, maladie transmise par des moustiques, le risque de transmission est plus important à proximité des étangs entourés d'une végétation dense que dans les autres types de paysages. Ces paramètres influencent également les capacités de dispersion des pathogènes en permettant l'existence ou non de corridors écologiques, leur permettant de se disperser d'une zone favorable à leur développement à une autre.

L'épidémio-surveillance, c'est-à-dire la surveillance de l'arrivée des bioagresseurs sur un territoire donné et de l'évolution de leurs populations doit donc prendre en considération les caractéristiques du paysage. Cet objectif constitue néanmoins un défi dans le cas des agrosystèmes dits « traditionnels » et les risques d'émergence tout comme les dynamiques épidémiologiques peuvent s'écarter des prédictions des modèles génériques ou de celles issues de modèles prévus pour des systèmes intensifs.

Pour décrire le paysage et pouvoir par la suite prendre en compte ses caractéristiques, on a recours à l'écologie du paysage. La description du paysage proposée par cette science peut se faire selon plusieurs approches. On peut en choisir des très descriptives, visant à rendre compte au mieux de la complexité de la réalité. D'autres proposent des représentations plus simplifiées, à l'instar de la théorie des métapopulations. Développée notamment par Levins (1969) et Hanski (1998), elle considère chaque population comme un ensemble de sous-populations locales, spatialement distinctes qui peuvent s'éteindre et être recolonisées (Grenfell & Harwood, 1997). Le paysage y est donc assimilé à un réseau idéalisé de taches d'habitats dans lesquels les espèces sont représentées par des populations connectées par la migration. Il s'agit d'un paysage simplifié mais pouvant bien rendre compte des populations des habitats fragmentés (Hanski, 1998).

La théorie des métapopulations présente également des liens avec l'épidémiologie végétale si on assimile la population étudiée aux agents infectieux ou aux parasites, les taches d'habitats aux plantes hôtes ou aux populations de plantes hôtes et la population minimale viable à la taille critique d'une communauté (Grenfell & Harwood, 1997). Les modèles élaborés selon l'angle de la théorie des métapopulations s'intéressent ainsi aux effets du paysage sur la migration, la colonisation, la distribution et la persistance des espèces. Ces travaux ont conduit à s'intéresser à la notion de

connectivité. La connectivité mesure comment la structure du paysage facilite ou empêche les mouvements des individus entre les taches d'habitats (Taylor et al., 1993, cité par Papaïx et al., 2014). Elle résulte de la structure du paysage d'une part (taille et disposition des taches d'habitat) et des capacités de dispersion des espèces habitant ce paysage d'autre part. Afin de rendre compte de ces aspects, on estime une connectivité dite « structurelle » si seules des données sur le paysage sont disponibles ou une connectivité dite « potentielle » ou « réelle » si on intègre des informations sur la dispersion de l'espèce (Calabrese & Fagan, 2004; Avon & Bergès, 2014). Ces dernières dépendent donc de l'espèce considérée (Meentemeyer *et al.*, 2012). Concrètement, la connectivité d'une tache d'habitat détermine sa probabilité de recolonisation après extinction locale, mais aussi sa diversité intra et interspécifique. En conséquence, la connectivité totale d'une métapopulation conditionne sa probabilité de persistance à long terme (Hanski, 1998). Des auteurs se sont donc penchés sur la question de contrôler la connectivité pour limiter la propagation des maladies (Parnell, 2006 cité par Papaïx et al., 2014). Il a ainsi été montré que la diversification du paysage ralentit la diffusion d'une maladie, notamment par effet de dilution (Keesing et al., 2006, cité par Papaïx et al., 2014). Par ailleurs, une diversification des plantes hôtes à l'échelle du paysage peut également diminuer la sévérité des maladies (Papaïx *et al.*, 2014).

Si la théorie des métapopulations peut représenter des paysages fragmentés et si des travaux ont déjà été réalisés pour prendre en compte le paysage dans la propagation de pathologie végétales, on peut se demander ce qu'il en est pour des paysages très hétérogènes et donc plus complexes comme ceux des agrosystèmes traditionnels. Il devient alors important de déterminer dans quelle mesure la connaissance du paysage peut améliorer la surveillance épidémiologique et la gestion des maladies.

Sur l'île de la Réunion, département ultramarin français de l'Océan Indien, la réémergence depuis 2012 du Huanglongbing, ou maladie du dragon jaune, menace la filière agrumicole. Couramment appelée HLB ou « *greening* », il s'agit d'une maladie systémique bactérienne (du genre *Candidatus liberibacter*), spécifique des agrumes. Elle provoque un dépérissement des arbres et est essentiellement transmise par des insectes, les psylles. Pour lutter contre la propagation de cette maladie, les arbres contaminés sont arrachés mais cela est coûteux en moyens humains et financiers et cette solution ne bénéficie pas d'une bonne acceptabilité. Cette dernière peut être améliorée par des tests de détection qui permettent en outre de surveiller la propagation de la maladie. Cependant, ces tests sont également coûteux et ne peuvent pas être effectués arbre par arbre à grande échelle. De plus, parce que les causes de cette réémergence sont mal comprises, les mesures de lutte sont loin de faire consensus parmi les acteurs. Les professionnels souhaitent naturellement privilégier la lutte contre les insectes vecteurs, qui a été un élément clé de la gestion de la crise précédente, aux arrachages. Or, les données d'observation des insectes, encore très parcellaires, ne laissent pas apparaître de pullulation. De plus, de nombreuses questions des professionnels concernant la lutte contre la maladie (volume à détecter, rayon d'arrachage, moratoire avant replantation...) restent sans réponse. En effet, si des travaux de recherches ont été menés pour établir des principes pour la lutte contre le HLB (Cunniffe *et al.*, 2015), ils ont été menés pour des paysages homogènes de grandes surfaces de vergers. Ils correspondent à ce qui peut être observé en Californie ou au Brésil mais ne sont pas applicables aux paysages hétérogènes de la Réunion.

En effet, sur ce territoire, la prise en compte des paysages pour la gestion de la maladie est particulièrement intéressante car l'hétérogénéité éco-climatique y est forte et présente à différentes échelles. Tout d'abord, le fort gradient altitudinal, de 0 à 3070m, et les fortes différences d'hygrométrie entre la côte au vent à l'est et la côte sous le vent à l'ouest (annexe 1) contribuent à créer des climats variés sur un territoire de seulement 2 512 km² (Aubert, 1987). L'hétérogénéité est également

structurale. En effet, les paysages agricoles sont fragmentés, particulièrement si on s'intéresse aux vergers d'agrumes. Ceux-ci s'étendent sur une superficie de 250 à 300 ha (DAAF-La Réunion, 2014) découpée en petites parcelles réparties sur des altitudes comprises entre 0 et 1200m (Dupré *et al.*, 2017). Les vergers sont présents sur l'ensemble de l'île mais de façon hétérogène : ainsi, une grande partie d'entre eux est localisée à Petite-Ile, commune du sud de l'île. Salazie, Saint-Paul et Saint-Benoît sont d'autres communes réunionnaises où des vergers d'agrumes sont significativement présents (DAAF-La Réunion, 2014)(voir cartes avec localisation des communes en annexe 1). De plus, il existe une hétérogénéité entre les exploitations. Ainsi, il existe des exploitations de plusieurs hectares dont les agrumes constituent la production majoritaire à des altitudes basses (<100 m) mais également de petits vergers couplés à d'autres cultures. Ceux-ci présentent l'intérêt pour leurs propriétaires d'être relativement faciles à cultiver car ne demandant pas beaucoup de main-d'œuvre, tout en constituant un complément de revenus stable et pérenne (Dupré *et al.*, 2017). Enfin, il existe une hétérogénéité si on considère les agrumes cultivés sur une même exploitation. Il en existe 27 espèces et variétés sur l'île et on retrouve généralement sur chaque exploitation, et parfois dans un même carreau, un mélange de plusieurs d'entre elles. Les plus courantes sont les mandarines, les oranges et les citrons mais il existe également des variétés à forte valeur ajoutée correspondant à des marchés de niche telles que les limes (*Citrus aurantiifolia*) et les combavas (*Citrus hystrix*) (Dupré *et al.*, 2017). Cette dernière espèce, utilisée dans de nombreux plats de la cuisine locale, tout comme le tangor (hybride de la tangerine et d'oranger (*Citrus x tangerina* et *Citrus sinensis*)) (figure 2) contribuent à l'importance patrimoniale des agrumes de la Réunion, célébrée annuellement lors de la fête des agrumes de Petite-Ile.

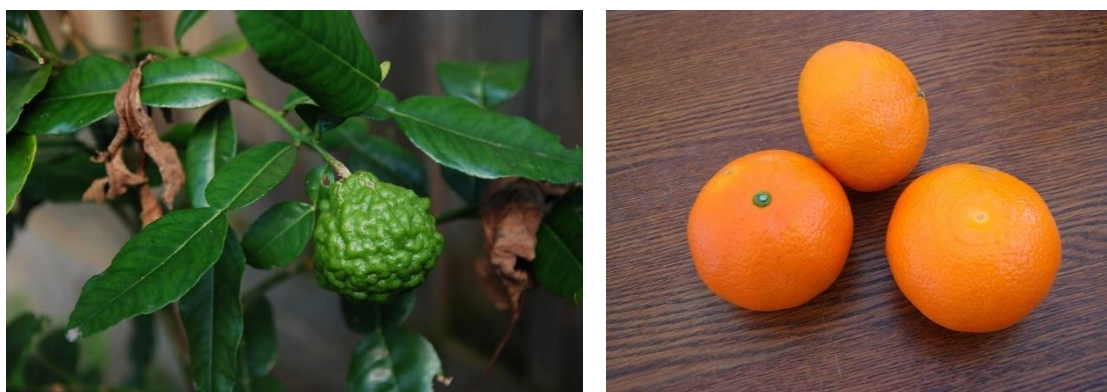


Figure 2 : Feuilles et fruit de combava (à gauche) et tangors (à droite)

Considérant le contexte de réémergence du HLB à la Réunion et son paysage agrumicole, on peut se demander s'il est possible d'améliorer la surveillance épidémiologique et la gestion du HLB à la Réunion par une meilleure prise en compte de la structure du paysage agrumicole.

Dans ce cadre, mon stage a consisté à accompagner la mise en place d'un projet de recherches visant à optimiser la surveillance et la gestion du HLB à la Réunion au travers d'une prise en compte explicite du paysage agrumicole. Une première étape a consisté à améliorer la connaissance du parcellaire. Pour cela, j'ai tout d'abord réuni les bases de données déjà existantes sous système d'informations géographiques (SIG). Celles-ci étant incomplètes, des prospections sur le terrain ont permis de compléter cette base de données. J'ai par la suite analysé le parcellaire produit pour mieux comprendre le fonctionnement de ce paysage. En particulier, j'ai cherché à savoir s'il existait des bassins de production d'agrumes sur l'île et des variations de connectivité selon les parcelles. Enfin, j'ai utilisé les données de détection réalisées pour savoir si on peut observer un lien entre l'altitude et la présence de la maladie.

1) Matériel et Méthodes

1.1) Le HLB à la Réunion

1.1.1) Généralités sur le HLB

Tous les agrumes sont sensibles au HLB mais à des degrés divers. Ainsi, les agrumes dits acides, comme les citrons sont moins sensibles que ceux dits sucrés (Aubert, 1992). Les mandarines et les oranges seraient par exemple particulièrement sensibles (Gottwald, 1989).

Concernant les symptômes (figure 3), les plus facilement identifiables, avant le dépérissement et la mort des arbres, sont un jaunissement asymétrique des feuilles et des flushs (jeunes feuilles à l'extrémité des rameaux) (Bové, 2006). Les fruits des arbres atteints peuvent également présenter une forme asymétrique, être de petite taille (Gottwald, 1989) et comporter des graines avortées (Bové, 2006).



Figure 3 : Symptômes du HLB sur flush, feuilles, fruit et arbre au Tampon

Cependant, l'identification de la maladie avec certitude n'est pas aisée avec ces seuls indicateurs. En effet, un jaunissement des feuilles peut également être causé par des carences en zinc ou en magnésium (Aubert *et al.*, 1996). De plus, si une durée de seulement 15 jours est nécessaire pour que les arbres deviennent infectieux (Lee *et al.*, 2015), il existe une période de latence de 6 à 12 mois lors de laquelle les arbres malades ne présentent pas de symptômes tout en pouvant transmettre la maladie (Bové, 2006). Le pourcentage d'arbres infectés est donc plus important que celui de symptomatiques (respectivement 50% et 30% par exemple) (Bové, 2006).

Du fait de la présence d'arbres asymptomatiques et de symptômes peu caractéristiques, la méthode officielle de détection est la PCR (*Polymerase Chain Reaction*) qui permet de détecter l'ADN de la bactérie à partir de broyat de nervures de feuilles (Aubert *et al.*, 1996). D'autres méthodes peuvent également être utilisées pour détecter l'ADN de la bactérie plus rapidement et à moindre coût. La PCR quantitative (QPCR) ou la LAMP (*Loop mediated isothermal amplification*) (Keremane *et al.*, 2015) sont par exemple en cours de développement.

Les bactéries causant le HLB appartiennent au genre *Candidatus liberibacter*. Trois lignées ont été recensées dans le monde : *americanus*, *africanus* et *asiaticus* (Bové, 2006). Seule la lignée *asiaticus* a été retrouvée sur l'île de la Réunion (Aubert *et al.*, 1996). Il s'agit d'une bactérie Gram- non cultivable qui se développe dans le phloème des plantes hôtes. Le HLB est donc une maladie systémique. Chez les arbres atteints, elle provoque des anomalies dans le développement des tissus conducteurs de sève et donc de la fonction de nutrition (Aubert, 1987).

La bactérie est transmise d'un hôte à l'autre par des psylles, insectes de l'ordre des hémiptères. Ainsi, les espèces *Diaphorina citri* et *Trioza erytreae* (figure 4) ont été identifiées comme vectrices du HLB. Ces psylles réalisent une partie de leur cycle de vie sur des arbres de la famille des Rutacées. Cette famille regroupe les agrumes, mais également d'autres espèces telles que *Murraya paniculata* (figure 4), couramment rencontré à la Réunion. Plus précisément, les larves tout comme les adultes se nourrissent du phloème des arbres, transmettant la bactérie d'un arbre à l'autre via leur salive. (Chiyaka *et al.*, 2012, cité par Narouei-Khandan *et al.*, 2016). Les vecteurs se déplacent donc d'un arbre à ses voisins mais peuvent également se disperser sur des distances pouvant atteindre 25 à 30 m. En cas de vent, cette distance peut atteindre 1.5 km voir plus en cas de tempêtes (Bové, 2006).



Figure 4 : *Murraya paniculata*, *Diaphorina citri*, *Trioza erytreae*

D. citri et *T. erytreae* ont été retrouvés à la Réunion, mais possèdent des aires de répartition différentes (Aubert *et al.*, 1996) (figure 5). Ainsi, *D. citri*, aussi appelé psylle asiatique préfère les régions chaudes et sèches. On le retrouve donc à des altitudes inférieures à 500 m, et préférentiellement dans la partie ouest de l'île correspondant à la côte « sous-le-vent ». *T. erytreae*, ou psylle africain, a lui des larves qui ont besoin d'une humidité minimale pour leur développement mais est retrouvé jusqu'à 1000m d'altitude. Il est donc présent sur toute la plage d'altitude où sont cultivés les agrumes (Aubert, 1987).

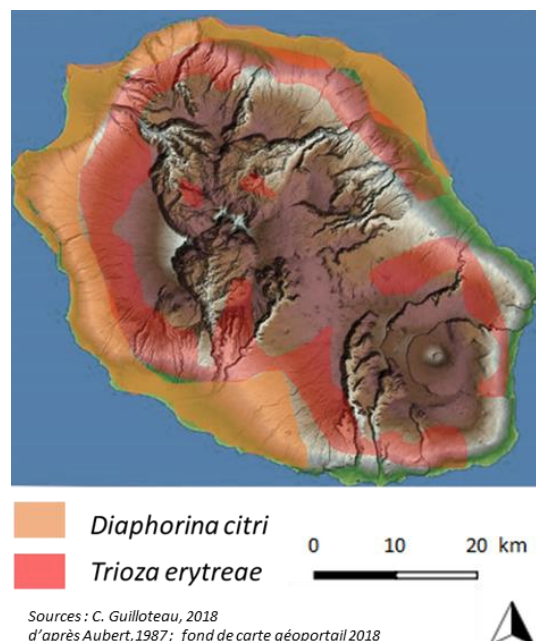


Figure 5 : Carte de répartition des deux espèces de psylles à la Réunion

On notera que si les noms vernaculaires des psylles correspondent aux continents où ils sont présents, ils peuvent néanmoins transmettre indifféremment les différentes souches de la bactérie (Aubert, 1987). Par ailleurs, d'autres espèces de psylles, morphologiquement proches et parfois difficiles à différencier ont été observées sur les agrumes, sans que l'on sache si elles peuvent transmettre le HLB ou non (Sauvion, 2018).

Enfin, si le HLB est essentiellement transmis par des psylles, une propagation par les pratiques humaines est aussi possible, par exemple par la greffe avec des arbres porteurs (Aubert, 1987) ou par la contamination des plants en pépinières, ensuite replantés dans les exploitations alentours.

1.1.2) La réémergence du HLB à la Réunion

Une première épidémie de HLB a eu lieu à la Réunion dans les années 1970-1980 (Gottwald, 1989). Pour lutter contre la maladie, les plants malades ont été arrachés en nombre, des plants sains ont été fournis (Aubert *et al.*, 1996) et des parasitoïdes des psylles ont été introduits en 1974 et 1978 (Aubert & Quilici, 1984). Grâce à l'absence de parasite secondaire, *Tamarixia dryi* et *Tamarixia radiata* ont effectivement parasité respectivement *T. erytreae* et *D. citri* (Aubert & Quilici, 1984). Les populations de psylles ont diminué, dans les vergers mais également en dehors, par exemple sur *M. paniculata* (Aubert & Quilici, 1984).

Depuis 2012, de nouveaux cas de HLB ont été observés sur l'île (V. Ravigné, comm. pers.). Les parasitoïdes sont toujours présents, aucune pullulation de psylles n'est relevée et c'est essentiellement *D. citri* qui est observé (M. Vinot, comm. pers.). Une hypothèse pour expliquer cette réémergence est la présence de vergers abandonnés et de vieux arbres malades n'ayant pas été arrachés après la première épidémie et qui auraient pu servir de « réservoirs ». La présence de *D. citri* dans de vieux arbres de jardins (Aubert *et al.*, 1996) et le fait que de vieux arbres soient atteints sont en faveur de cette hypothèse. Une autre possibilité serait l'introduction d'une nouvelle souche de la bactérie, mais la validation ou non de cette hypothèse nécessiterait des travaux de génétique des populations.

1.1.3) Les organismes chargés de la gestion du HLB à la Réunion

Plusieurs organismes ont un rôle dans la gestion du HLB à la Réunion et collaborent au sein de différentes instances :

- La **DAAF** (direction régionale de l'alimentation, de l'agriculture et de la forêt) établit les plans de surveillance avec l'appui des autres organismes, commande 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 ;

- 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 *insect-proof*. Elle forme également des pépiniéristes à produire ces plants sains ;

- L'**ANSES** (agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail) est en charge de la mise au point de méthodes officielles de détection et de surveillance ainsi que de leur évaluation ;

- 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. C'est au sein de cette UMR que j'ai effectué mon stage et plus particulièrement dans son équipe consacrée au compartiment végétal.

L'hébergement du Cirad et de la FDGDON au sein du même bâtiment, le 3P (pôle de protection des plantes), et la proximité géographique de la DAAF et de l'Armeflhor avec le 3P facilitent les échanges entre ces organismes. Les différents acteurs se réunissent ensemble et avec des représentants de l'Etat, des collectivités territoriales et des agriculteurs. Les décisions concernant la gestion de la maladie sont votées lors de CROPSAV (conseils régionaux d'orientation de la politique sanitaire animale et végétale). Les arrêtés préfectoraux sont ensuite signés par les élus et représentants des différentes institutions (DAAF, 2018). Entre les CROPSAV, des réunions spécifiques à chaque maladie et filière appelées comités de pilotage sont l'occasion de préparer au mieux les projets de surveillance et de lutte à proposer au CROPSAV.

Néanmoins, la communication vers les agrumiculteurs reste limitée, ceux-ci n'étant pas organisés en filière au vu du type de production. En effet, seulement 10 % de l'aire de production est concernée par des coopératives mais ne dispose pas de système assurantiel pour autant (Dupré *et al.*, 2017).

1.1.4) Surveillance et gestion du HLB à la Réunion

La FDGDON a réalisé des prélèvements depuis 2015 afin de détecter la présence de la maladie. L'échantillonnage a été concentré sur certaines zones, notamment sur la commune de Petite-Ile, et s'est fait sur présomption avant 2017. L'effort d'échantillonnage a été augmenté au fil des années puisque le nombre de parcelles détectées par an est passé de 12 en 2015 à 100 en 2018, et sur un spectre plus large de communes. Les objectifs des détectations ont également été revus. Si les premières détectations visaient à confirmer la réémergence du HLB, celles de 2018 avaient pour objectif de savoir s'il restait des zones indemnes. Un nouveau plan d'échantillonnage, mandaté par la DAAF, a alors été mis en place pour limiter le nombre de faux négatifs et augmenter le volume de détection. Les zones à échantillonner sont les hauts de Saint-Paul et du Tampon ainsi que le cirque de Salazie où les 100 prélèvements de 2018 ont été effectués. Pour chaque détection de parcelle, on teste 60 arbres par hectare, groupés par lots de 5, en prélevant 15 feuilles par arbre. Un test par PCR est ensuite effectué avec 1 gramme des nervures de feuilles de chaque lot.

Lorsqu'un lot d'arbres se révèle positif au HLB, le prélèvement de greffons et la vente de matériel végétal de ceux-ci sont interdits par arrêté préfectoral. Cependant, les conséquences majeures suite à un prélèvement positif sont l'arrachage et l'élimination des arbres ou lots d'arbres détectés par des agents de la DAAF ou de la FDGDON afin de limiter la propagation de la maladie (Le Préfet de la Réunion, 2016). L'instauration de primes à l'arrachage et d'aides à la replantation de plants CAC pour améliorer l'acceptabilité de ce processus sont en discussion.

Par ailleurs, l'utilisation de kaolinite est une nouvelle méthode de lutte en cours d'homologation. L'application de ce minéral argileux sur les feuilles empêcherait les psylles de s'y poser et donc de contaminer de nouveaux arbres (Callies, 2018).

1.1.5) Les bases de données existantes

En début de stage, des bases de données SIG sur les parcelles d'agrumes de la Réunion étaient disponibles, sous forme de couches d'information géographique au format shapefile (.shp). Les noms figurants entre guillemets seront utilisés par la suite pour désigner les bases de données correspondantes :

- La couche « **RPG** » est un extrait du registre parcellaire graphique de 2016, comportant uniquement des agrumes. Ces données, fournies par la DAAF, sont issues du recensement effectué par l'agence des services de paiements sur la base des déclarations des agriculteurs pour percevoir les aides de la politique agricole commune ;

- La couche « **Base fruit** » a été fournie par la chambre d'agriculture et a été constituée au cours de tournées de terrain d'un agent de la chambre, en 2016 et 2017 ;

- La couche « **vérif_Pruvost** » comporte des parcelles prospectées par des chercheurs du Cirad entre 2008 et 2016 dans le cadre de leurs recherches.

En plus de ces bases de données, des informations sur les vergers (pouvant être des agrumes ou non) sont également fournies par les bases de données suivantes :

- La couche « **bos 14** » datant de 2014 est la base d'occupation du sol fournie par la DAAF. Elle comporte des parcelles de vergers vérifiées sur le terrain entre 2012 et 2014 ;

-Enfin, la couche « **rajout bos 14** » provient de photo-interprétations d'images aériennes de la commune de Petite-Ile réalisées en 2017 (Maillot, 2017). Les contours des parcelles de vergers de la commune de Petite-Ile ont été tracés à partir de l'orthophotographie IGN de 2013, confirmés et complétés à partir des images disponibles sur Google Earth. Ce travail a été nécessaire car la télédétection ne permet pas pour le moment de les détecter automatiquement et informatiquement (Dupuy *et al.*, 2017). De plus, si les alignements d'arbres des vergers sont facilement discernables à l'œil nu, on ne peut pas distinguer les vergers d'agrumes des autres types de vergers comme ceux de letchis ou de manguiers (annexe 2). Cependant, la grande majorité des vergers de la commune de Petite-Ile étant des vergers d'agrumes, cette base de données fournit indirectement des informations sur le parcellaire agrumicole.

Selon les bases de données, des informations temporelles peuvent également être disponibles. En plus des dates de relevés, des dates de plantation peuvent être renseignées. Des dates de début (plantation) et de fin (arrachage) sont également présentes pour certaines parcelles et ont été déterminées à partir des images satellites disponibles sur Google Earth.

Par ailleurs, des données issues des détectations officielles dans les vergers d'agrumes réalisées par la FDGDON entre 2015 et 2018 ont été utilisées. Elles sont composées de 195 points de prélèvements dont on connaît les coordonnées, réalisés sur 15 communes de l'île.

1.2) Amélioration de la connaissance du parcellaire agrumicole

1.2.1) Synthèse des données existantes

Face aux différents niveaux de précisions fournis par les bases de données (dates renseignées et tracé du contour) et puisqu'une même parcelle peut être présente dans plusieurs bases de données, j'ai créé une nouvelle couche SIG pour regrouper les informations disponibles et conserver le contour des parcelles le plus précis. Les contours de la base de données la plus précise (vérif Pruvost) ont été préférés puis ceux de RPG pour les parcelles non référencées sur vérif Pruvost. Les contours des bases de données rajout bos 14, Base fruit et de la bos 14 ont été ensuite utilisés dans cet ordre en suivant la même logique.

Les données de la base de données issue de la fusion ont ensuite été complétées. Tout d'abord, les dernières images satellites disponibles sur Google Earth et datant de l'été 2017 ont été utilisées pour compléter la photo-interprétation sur la commune de Petite-Ile. En effet, le paysage agrumicole évolue rapidement et des parcelles ont pu être plantées depuis la réalisation de la base de données rajout bos 14.

Ensuite, des informations ont été ajoutées à l'aide des logiciels QGIS 2.18.6 (Equipe de développement QGIS, 2016) et Excel afin de renseigner pour l'ensemble des parcelles leur surface, la commune où elles sont localisées, la présence d'incohérences entre les dates de début, de fin, de relevés et de plantations. Pour les parcelles déterminées comme étant des agrumes, une vérification a été effectuée à l'aide des images satellites pour les classer selon leur apparence. Ont ainsi été différenciées les parcelles présentant des arbres alignés, celles pour lesquelles on observe du feuillage mais trop dense pour déterminer s'il s'agit d'une plantation, d'une forêt ou d'un jardin (annexe 2) et celles dont l'occupation du sol n'est pas un verger (champ de canne à sucre, constructions). Les dates de début et de fin ont également été renseignées ou vérifiées à partir des images satellites pour les parcelles situées sur la commune de Petite-Ile. Plus précisément, j'ai ajouté les dates de début pour les 183 parcelles où elles étaient manquantes et renseigné ou vérifié celles de fin pour les 375

parcelles. On a considéré comme date de début celle de la première image sur laquelle on observe des alignements d'arbres et comme celle de fin celle de la première image où l'on ne voit plus d'arbres alignés ou à défaut, celle de la dernière image disponible. Les dernières images disponibles au moment de la création de la couche rajout_bos_14 datant de 2016, j'ai vérifié l'ensemble des dates de fin pour différencier les parcelles qui ont été arrachées entre 2016 et 2017 de celles toujours visibles sur les images de 2017.

Le récapitulatif des différents champs utilisés dans la base de données est fourni en annexe 3.

1.2.2) Prospections sur le terrain

Comme il est impossible de différencier quels arbres fruitiers sont présents dans les vergers à partir des images aériennes et satellites, il a été nécessaire de réaliser des prospections sur le terrain pour les déterminer. Pour cette partie du stage, j'ai bénéficié de l'appui de Corentin Exbrayat, également stagiaire au Cirad. En binôme, nous avons effectué des prospections sur le terrain, afin de vérifier la présence ou non de vergers d'agrumes. En amont des sorties, nous cartographions les parcelles de verger de la zone à prospecter à l'aide de la base de données dont nous disposions et des images satellites. Lors des prospections, nous recherchions les parcelles cartographiées en nous aidant d'une tablette de terrain. Lorsque les parcelles étaient accessibles sans s'engager sur des voies privées, leurs positions GPS ont été relevées. Celles-ci, avec les images satellites, ont ensuite facilité le renseignement de la base de données. Lorsque les agriculteurs étaient présents sur la parcelle ou que nous pouvions l'observer depuis les voies d'accès, l'espèce et la présence de symptômes ont été relevées.

Par commodité et pour renforcer notre utilité pour la gestion de la crise sanitaire en cours, nous avons ciblé prioritairement certaines zones (figure 6), notamment celles dont l'isolement géographique pourrait leur permettre d'être indemnes.

Nous avons ainsi commencé nos prospections à Saint-Pierre, car des parcelles d'agrumes basses sont connues pour être infectées (figure 6) et des parcelles plus hautes en altitude pourraient conduire la maladie jusqu'au Tampon, commune qui présente un fort gradient altitudinal (de 287 à 2418m d'altitude). Une meilleure connaissance du parcellaire agrumicole de ces deux communes pourra par la suite permettre de savoir jusqu'à quelle altitude le HLB peut être présent et s'il existe une zone tampon sans agrumes qui pourrait constituer une barrière géographique capable de stopper la propagation du HLB. Par ailleurs, en effectuant des prospections en amont des prélèvements de la FDGDON dans les hauts du Tampon mais également dans ceux de Saint-Paul, nous avons pu fournir à cet organisme des données utiles pour la planification de leurs détectations ayant pour but de vérifier que ce sont des zones indemnes. Enfin, la zone de Salazie a été choisie pour évaluer si la géographie du cirque permettrait de protéger les cultures. Des prospections y ont été effectuées avec la FDGDON, qui avait préalablement contacté les agriculteurs. Ainsi, si moins de parcelles ont été prospectées, plus d'informations ont été relevées pour les parcelles dans ce cirque de l'île.

Par ailleurs, nous n'avons pas effectué de prospections à Petite-Ile, bien que ce soit la plus grosse zone de production de l'île. Nous avons fait ce choix car cette zone a déjà été beaucoup étudiée, par photo-interprétation et lors de prospections de la DAAF et la Chambre d'Agriculture. De plus, étant déjà très contaminée, cela ne correspondait pas avec l'objectif de recherche de zones indemnes.



Figure 6 : Carte présentant les zones prospectées sur le terrain

1.2.3) Extrapolation par krigeage

Certaines parcelles n'ayant pas été visibles lors des prospections et afin de compléter notre vision du parcellaire agrumicole, j'ai utilisé une extrapolation par krigeage réalisée avec le package *automap* de R (version 3.4.4)(R Development Core Team, 2005). Ce krigeage estime pour chaque parcelle la probabilité qu'elle contienne des agrumes en fonction de la structure du paysage alentour. Il repose sur le fait que les agrumes sont plantés de façon légèrement agrégée et non aléatoirement dans le paysage, du fait de contextes climatiques favorables et de la localisation des savoir-faire.

Pour ce faire, j'ai utilisé les centroïdes des parcelles de notre base de données dont l'occupation du sol a été vérifiée. Ces centroïdes ont des coordonnées de latitude et de longitude et on affecte une valeur de 1 à ceux correspondant à des vergers d'agrumes et 0 aux autres. A partir de ces données, j'ai tracé un variogramme expérimental, représentant l'influence qu'a la présence d'une parcelle d'agrumes sur la probabilité d'avoir des parcelles d'agrumes autour, en fonction de la distance. Le principe sous-jacent est que plus on est proche d'une parcelle d'agrumes, plus la probabilité d'avoir des agrumes est forte et inversement. A partir de ce variogramme, on peut donc estimer si les centroïdes correspondants aux parcelles dont on ne connaît pas l'occupation du sol sont des agrumes ou non, à partir de la valeur entre 0 et 1 estimée lors du krigeage. On considère que si la valeur estimée est supérieure à 0,95, il s'agit d'une parcelle d'agrumes.

Considérant la variabilité des paysages sur l'île, je n'ai utilisé cette extrapolation que pour les zones qui ont été prospectées et pour lesquelles on a donc des données plus précises. Elles permettent de faire un krigeage plus fiable. J'ai vérifié la fiabilité de la méthode en comparant les valeurs prédites aux valeurs réelles, pour les parcelles dont on connaît la nature.

1.3) Analyse de la structure spatiale du paysage agrumicole

Une fois la fusion des bases de données réalisée et après les prospections effectuées sur le terrain, on peut faire une première analyse du paysage et de sa structure. Pour cette partie, je considère comme étant des agrumes les parcelles ayant été vérifiées récemment : celles prospectées pendant le stage et celles des bases de données Base fruit et vérif Pruvost. J'ai réalisé un filtrage sur ces deux bases de données pour ne conserver que les parcelles dont l'aspect sur les images satellites correspond à un verger.

1.3.1) Répartition géographique des surfaces agrumicoles

Une première approche pour analyser le paysage agrumicole consiste à étudier la répartition des surfaces selon les communes. On obtient ainsi facilement une première approximation des zones agrumicoles.

QGIS permet de calculer la matrice des distances entre les centroïdes des parcelles. La distribution de ces distances fournit également des informations sur l'organisation spatiale des parcelles, en permettant de savoir si elles sont regroupées ou non.

1.3.2) Evaluation de la connectivité du paysage avec différents indices

Pour décrire l'arrangement spatial de différents éléments du paysage, des indices de répartition spatiale peuvent être utilisés. Ils permettent de caractériser rapidement la connectivité sur de grandes surfaces (Calabrese & Fagan, 2004) et de déterminer si on peut créer des groupes de parcelles selon leur connectivité. Comme peu de données sur la propagation du HLB étaient disponibles dans la littérature (et aucune pour la Réunion), je me suis concentrée dans un premier temps sur la connectivité structurelle. Pour les indices mesurant ce type de connectivité, les calculs utilisent la surface des taches d'habitats et/ou les distances qui les séparent mais le poids accordé à ces deux paramètres diffère selon les indices.

Une première approche consiste à savoir si les parcelles sont groupées et forment des bassins de production. Pour le savoir, j'ai formé des groupes de parcelles distantes de moins d'une distance seuil. N'ayant pas de distance seuil évidente correspondant aux capacités de dispersion du vecteur, j'en ai testé plusieurs, tout en notant le nombre de groupes formés pour chaque distance considérée.

Toujours en ne prenant en compte que les distances, on calcule pour chaque parcelle i du paysage l'indice C_i :

$$C_i = \sum_j \frac{1}{d_{ij}}$$
 où d_{ij} est la distance entre les parcelles i et j . Cet indice, en prenant en compte l'inverse des distances permet d'avoir un indice C_i plus fort pour une parcelle qui aura des voisins proches et qui sera donc plus connectée.

Les indices prenant en compte les distances et les aires des taches sont plus aptes à décrire un paysage fragmenté comme celui qui est étudié ici (Moilanen & Nieminen, 2002). Pour prendre en compte la superficie des parcelles en plus des distances inter-parcelles, on peut utiliser l'indice T_i (ci-après désigné par « tampon ») suivant qui calcule pour chaque parcelle i :

$T_i = \sum_j A_j$ où les A_j sont les aires des parcelles j situées à moins d'une distance seuil de la parcelle i . Comme pour les bassins de production, j'ai testé plusieurs valeurs de distances seuil.

Bien qu'il n'y ait que peu de données sur la dispersion du HLB, on peut néanmoins utiliser les travaux de Cuniffe et al (2015) pour calculer une probabilité de connectivité potentielle (Avon & Bergès, 2014). Celle-ci intègre un kernel de dispersion qui est couramment utilisé en écologie pour modéliser les phénomènes de propagation (Hanski, 1998; Facon & David, 2006; Avon & Bergès, 2014). L'exponentielle qu'il comporte rend compte que la probabilité de contamination est beaucoup plus forte à courte distance et diminue de façon non proportionnelle quand on la distance augmente. On a ainsi :

$PC_i = \frac{\sum_j a_i a_j p_{ij}}{A_T^2}$ avec $p_{ij} = B e^{-\theta d_{ij}}$ (Avon & Bergès, 2014; Cuniffe et al., 2015), où a_i et a_j sont les aires des parcelles i et j , d_{ij} la distance entre les parcelles i et j , A_T l'aire de la zone considérée (ici l'île de la Réunion) et θ le facteur de dispersion. On prend dans notre cas $\theta = 0.1 \text{m}^{-1}$ qui correspond à une valeur estimée sur une épidémie de HLB dans des jardins en Floride (Parry et al. 2014 cité dans Cuniffe et al., 2015). L'objectif étant de comparer différentes zones de la Réunion, j'ai fixé $A_T = 1$. De même, la constante de normalisation du paysage B prise en compte dans le calcul du kernel de dispersion p_{ij} se voit attribuer une valeur de 1.

Pour effectuer ces opérations, on utilise la matrice des distances et les superficies des parcelles calculées sous QGIS. Ensuite, les indices sont calculés à l'aide de R (pour C_i et PC_i). Lorsque l'on fait intervenir une distance seuil (pour les bassins de production et T_i), j'ai utilisé le langage de programmation Ocelet. Celui-ci permet de faire des simulations spatiales et temporelles, et a été développé par des chercheurs du Cirad (Degenne & Lo Seen, 2016). Son fonctionnement est basé sur l'utilisation de graphes d'interaction pour représenter les liens entre les différentes entités modélisées (parcelles, environnement extérieur...).

1.4) Effet du paysage sur la répartition de la maladie

1.4.1) Lien entre l'altitude et la présence/absence de maladie

Pour étudier un éventuel lien entre l'altitude et la présence de la maladie, j'ai utilisé les données de détections fournies par la FDGDON. Je n'ai pris en compte que les points localisés sur la commune de Petite-Ile. En effet, contrairement aux prélèvements réalisés dans les autres communes, ils sont relativement nombreux (35), comportent à la fois des positifs et négatifs et sont positionnés le long d'un gradient altitudinal, entre 108 et 1000m d'altitude.

Trois modèles ont été ajustés aux données. Le premier suppose une relation linéaire entre le pourcentage de parcelles infectées et l'altitude. Ce modèle a deux paramètres : une ordonnée à l'origine et une pente. Le deuxième suppose qu'il existe deux taux d'infection différents, selon qu'on se situe en dessous ou au-dessus d'une altitude seuil (modèle en « marche d'escalier »). Il a deux paramètres également dans la version que nous avons testée, le taux d'infection en dessous du seuil

$y = \frac{b}{1 + e^{a(z-c)}}$	<p>Signification des paramètres :</p> <ul style="list-style-type: none"> -a : pente au niveau du seuil -c : valeur de l'altitude z au niveau du seuil -b : prévalence avant le seuil (pour $x=0$)
--------------------------------	--

Figure 7 : Formule du modèle log-logistique retenu

et l'altitude seuil au-delà de laquelle la maladie est absente. Le dernier modèle suppose une relation sigmoïde asymétrique (modèle log-logistique). Il a trois paramètres exposés ci-dessous :

Pour chaque modèle on calcule la vraisemblance du modèle V , qui est la probabilité d'observer les données sachant les paramètres. Les paramètres sont estimés par maximum de vraisemblance. Pour les deux premiers modèles cette opération est réalisée avec le logiciel Mathematica (Wolfram Research, 2018). Pour le modèle de sigmoïde asymétrique, j'ai utilisé le package *drc* de R et sa fonction *drm* qui permet de tester des GLM (*generalized linear models*) avec l'hypothèse que la répartition des résidus suit une loi binomiale. Dans les trois cas, on ne détecte pas de sur-dispersion (le coefficient de quasi binomiale est très proche de 1).

1.5) Premières simulations sur Ocelet

Le langage Ocelet permet de faire communiquer facilement un programme de dynamique de population avec une ou des couches d'information géographique et donc de développer des simulations de dynamique dans un paysage avec d'éventuelles modifications concomitantes du paysage. Par exemple, dans le cas du HLB, la maladie tue les arbres qu'elle infecte et une des mesures de gestion envisagée est l'arrachage. Il ne suffit donc pas de modéliser la dynamique de la maladie dans le paysage que nous avons documenté, il faut aussi tenir compte de son effet (mort des arbres) et de l'arrachage sur ce paysage.

Les lois qui guident la propagation de la maladie à la Réunion n'étant pas définies, j'ai exploré le fonctionnement d'Ocelet pour voir comment il pouvait être utilisé pour modéliser une épidémie sans chercher à avoir des paramètres représentatifs de la réalité (voir annexes 6 à 8). Le but a été de mettre en place les différents compartiments et leurs interactions pour pouvoir par la suite y insérer des fonctions cohérentes de propagation, de probabilité d'arrachage...

L'unité de base de la propagation est la parcelle, on néglige la dynamique spatiale intra-parcellaire. Quatre états ont été définis pour les parcelles et associés chacun à un chiffre : 1 pour « sain » ; 2 pour « latence » c'est-à-dire les parcelles infectées mais non symptomatiques ; 3 pour « symptomatique » c'est-à-dire les parcelles infectées et symptomatiques et 4 pour « arraché ».

Une parcelle est choisie au hasard pour le départ de la maladie. La propagation se fait uniquement entre les parcelles connectées lors d'un pas de temps donné. Cette connexion peut se faire uniquement entre des parcelles non arrachées et dépend de la distance entre les parcelles, une distance seuil étant déterminée pour chaque pas de temps (en considérant qu'elle peut varier selon la saison, les conditions météorologiques...). Si une parcelle est connectée à plusieurs autres, son état passe à celui correspondant à celui de sa voisine au chiffre le plus élevé (1,2 ou 3). Le passage à l'état 3 (« symptomatique ») se fait également de façon automatique pour les parcelles qui étaient à l'état 2 au pas de temps précédent. Pour le passage à l'état 4 (« arrachage »), une probabilité d'arrachage permet d'arracher ou non les parcelles d'état 3, à chaque pas de temps.

Comme il a été mentionné, les lois de probabilités utilisées, des lois uniformes, et les valeurs seuils prises ne correspondent pas à des réalités biologiques. Ce modèle pourra également être amélioré en prenant comme unité des arbres ou des portions de parcelles.

2) Résultats

2.1) Première description du parcellaire à partir de la fusion des bases de données initiales

2.1.1) Production d'une synthèse des données géographiques disponibles

La fusion des bases de données a été réalisée (tableau 1). Cette opération est moins simple qu'il n'y paraît du fait qu'à une parcelle d'une base de données peuvent correspondre plusieurs parcelles d'une autre base de données, la définition de parcelle variant entre sources de données (figure 8). Nous avons retenu une définition assez restrictive de la parcelle, comme une unité géographique, homogène en termes de variété et de date de plantation. Bien qu'on ne puisse appliquer cette définition à la lettre en l'absence de données sur l'histoire des parcelles, elle nous conduit à définir des petites parcelles au sein de chaque exploitation. Ainsi le contour de 399 parcelles a été retracé. Après la fusion des bases de données, 41 parcelles supplémentaires ont été tracées sur la commune de Petite-Ile. Concernant les informations temporelles, 183 dates de début et 315 dates de fin ont été ajoutées. Pour 13 parcelles, on a des superpositions de parcelles correspondant à un arrachage et un replantage des arbres. On obtient finalement une nouvelle base de données dénommée « base de données initiale » par la suite comportant 2271 parcelles de vergers dont 421 sont signalées comme étant des agrumes. L'information sur l'origine de la donnée a été soigneusement conservée afin de pouvoir sélectionner facilement dans cette base de données les parcelles qui ont été confirmées récemment sur le terrain ou alternativement toutes les parcelles soupçonnées d'être des agrumes même sans vérification de terrain. Cette première base constitue en soi une amélioration importante de la connaissance du paysage agrumicole du fait de leur importante (et surprenante) complémentarité. En effet, sur 411 parcelles d'agrumes actuelles, 126 sont répertoriées dans une seule base de données et seulement 25 sont communes aux 5 bases de données.

Tableau 1 : caractéristiques des bases de données disponibles en début de stage et de celle obtenue à l'issue de leur fusion

Base de données (nombre de parcelles)	Type	Nombre de parcelles confirmées par une visite sur le terrain (date)	Nombre de parcelles avec une date de plantation indiquée	Nombre de parcelles avec des dates de relevé sur Google Earth indiquées
Vérif_Pruvost (133)	agrumes	133 (entre 2008 et 2016)	0	133
RPG (157)	agrumes	0	0	0
Rajout bos 14 (276)	vergers	0	0	276
Base fruit (86)	agrumes	71 (2016 ou 2017)	11	0
Bos 14 (1870)	vergers	1870 (2012, 2013 ou 2014)	0	0
Initiale (2271 dont 414 agrumes)	agrumes et vergers	2062	12	544 (début) -549 (fin)



Figure 8 : exemple de tracés de parcelles différents pour deux bases de données
(Source : capture d'écran QGIS, fond de carte Google Earth)

2.1.2) Première description du parcellaire à partir de la base de données initiale

Localisation et taille des parcelles

D'après cette base de données initiale, il existe 158 ha de vergers d'agrumes répertoriés en tant que tels, sur les 1957 ha de vergers recensés sur l'île. Ces vergers d'agrumes sont répertoriés sur 20 des 24 communes réunionnaises (figure 9 et 10). La commune de Petite-Ile se démarque avec 56 ha d'agrumes et 360 parcelles recensées. Les communes de Saint-Pierre, Saint-Paul, Saint-Benoît, Salazie et le Tampon sont les seules autres communes ayant plus de 10 ha d'agrumes. Le détail des superficies de vergers d'agrumes est disponible en annexe 4.

Localisation des parcelles de vergers d'agrumes d'après la base de données initiale

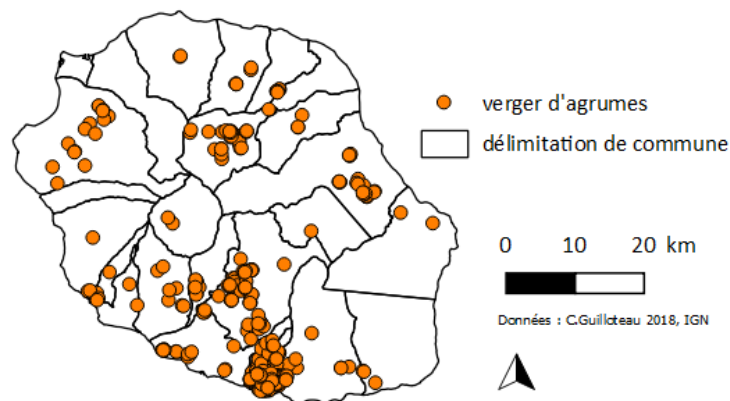


Figure 9 : Carte de localisation des vergers d'agrumes selon la base de données initiale.

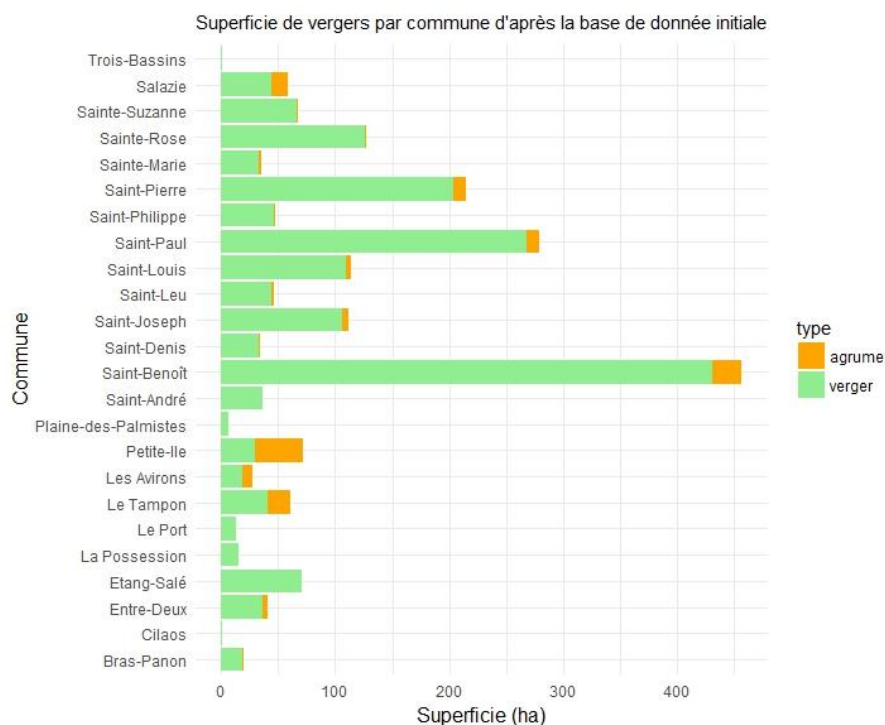


Figure 10 : Superficies de vergers par communes d'après la base de données initiale

Les autres types de vergers peuvent être par exemple des vergers de manguiers, de litchis ou des bananiers, selon la commune considérée. Par exemple, sur la commune de Saint-Benoît, on trouvera majoritairement des vergers de litchis (DAAF-La Réunion, 2014).

On peut constater avec la base de données initiale que les parcelles sont de petite taille. Leur superficie moyenne est de 0,44 ha et leur distribution (figure 11) montre que seules de très rares parcelles ont une superficie supérieure à 2 ha, celles-ci étant réparties de façon hétérogène sur l'île. Cela confirme l'existence d'un parcellaire de petite taille et fragmenté. A titre d'illustration, le tracé des parcelles de Petite-Ile est présenté en figure 12.

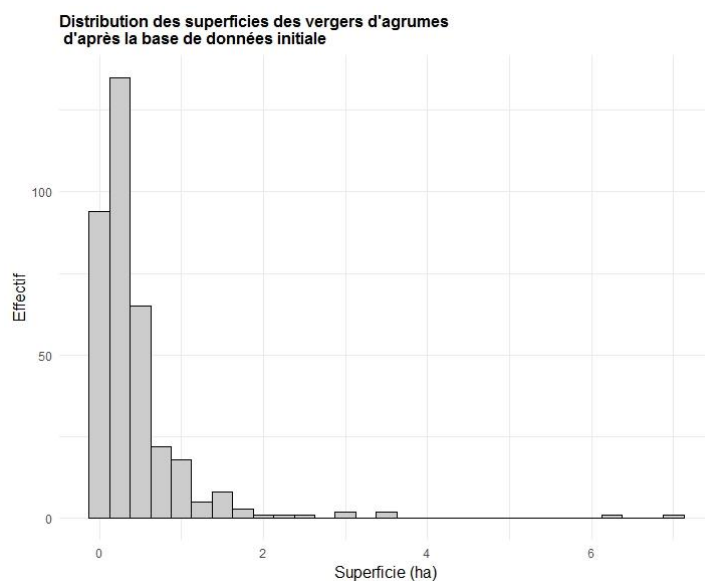


Figure 11 : Distribution des superficies des vergers d'agrumes d'après la base de données initiale.



Figure 12 : Carte des parcelles de vergers d'agrumes de la commune de Petite-Ile.

Distribution des distances

La distribution des distances (figure 13) entre les parcelles nous montre que les parcelles sont réparties en plusieurs groupes et non pas de façon uniforme sur le territoire.

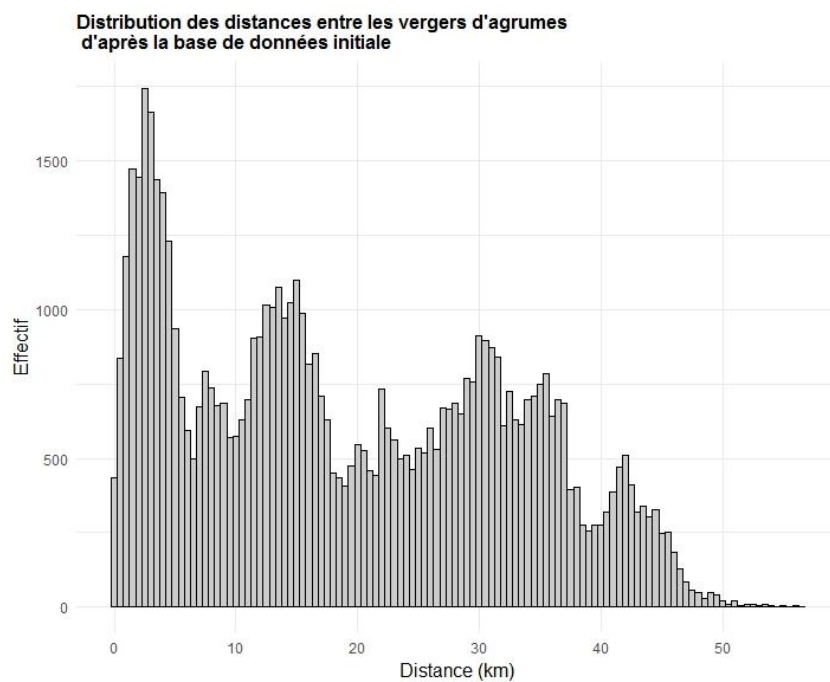


Figure 13 : distribution des distances entre les parcelles d'agrumes référencées dans la base de données initiale.

En effet, on obtient une courbe multimodale dont le premier pic correspond aux distances entre les parcelles proches, et appartenant donc à un même groupe. Les pics suivants correspondent aux distances entre deux groupes de parcelles donnés.

2.1.3) Importance du choix du tracé dans le calcul des superficies

Nous obtenons environ 160 ha de vergers d'agrumes répertoriés alors que la DAAF en mentionne 307 ha en 2010 (DAAF-La Réunion, 2014). On peut supposer que le manquement de certaines parcelles dans la base de données est un élément d'explication mais le choix du tracé des parcelles peut aussi causer des variations importantes dans le calcul des superficies. En effet, une même parcelle présente dans plusieurs bases de données n'aura pas le même contour. Pour évaluer cette variabilité, j'ai calculé la superficie des 25 parcelles communes aux 5 bases de données, selon chacune de celles-ci (figure 14).

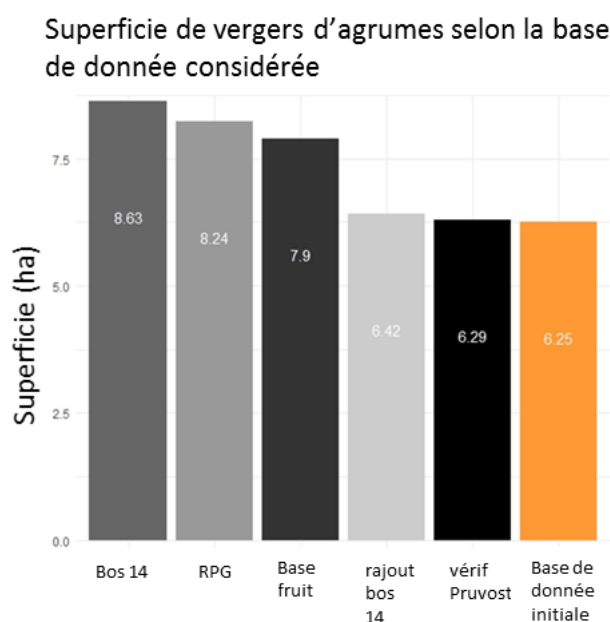


Figure 14 : Superficies des parcelles communes à toutes les bases de données, selon celle considérée.

Les écarts de superficies entre les bases de données peuvent être importants. En particulier, la surface répertoriée par la DAAF est de 38% supérieure à celle que nous avons dans notre base de données initiale. Cela peut expliquer en partie la différence entre les superficies totales d'agrumes de l'île estimées avec notre base de données et par la DAAF. On peut noter que les trois bases de données avec les superficies les plus faibles ont été tracées à partir des images satellites.

Dans la continuité de cette démarche, on peut comparer la distribution des superficies des parcelles déjà existantes (« conservées ») de celles qui ont été retracées et de celles qui ont été dessinées pendant le stage (« tracées ») (figure 15). Les parcelles « tracées » sont généralement plus petites. On peut se demander si c'est parce qu'elles sont petites qu'elles n'ont pas été référencées ou si c'est le tracé fait plus précisément qui explique cette différence de superficie. Les parcelles retracées étant également plus petites mais légèrement plus grandes que celles déjà tracées, on peut supposer que les deux hypothèses expliquent chacune en partie les différences de distributions.

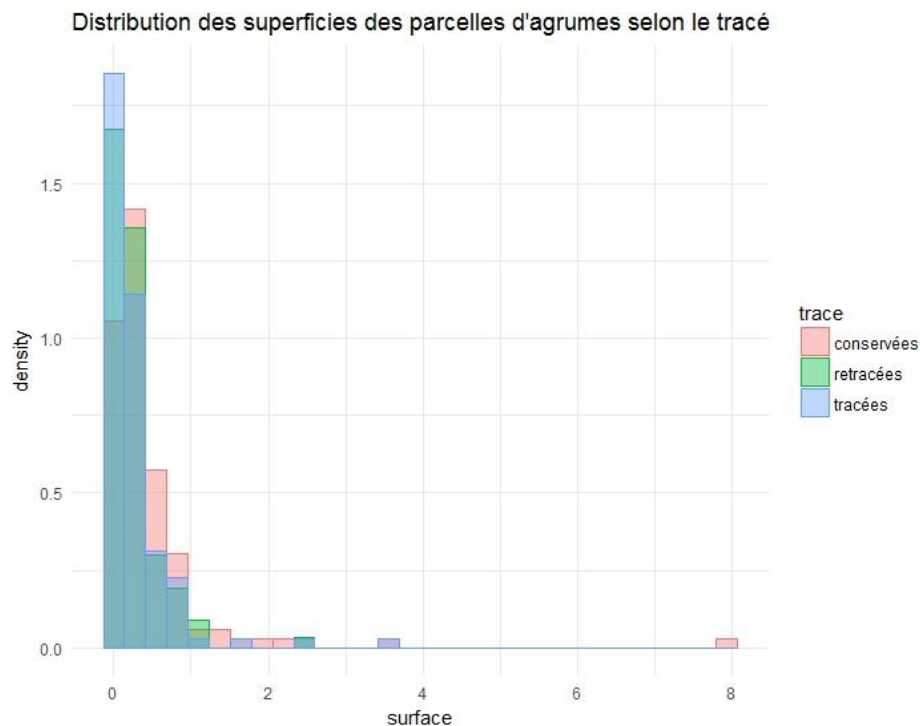


Figure 15 : distribution des superficies de parcelles d'agrumes selon le type de tracé

2.2) Amélioration de la précision du parcellaire grâce aux prospections sur le terrain

2.2.1) Effort d'échantillonnage

Au cours du stage, nous avons prospecté 505 parcelles (figure 16) dont 43 avec la FDGDON, au cours de 17 sorties de durée variable de la demi-journée à la journée. En tout, 406 ha ont été prospectés dont 63 ha d'agrumes.

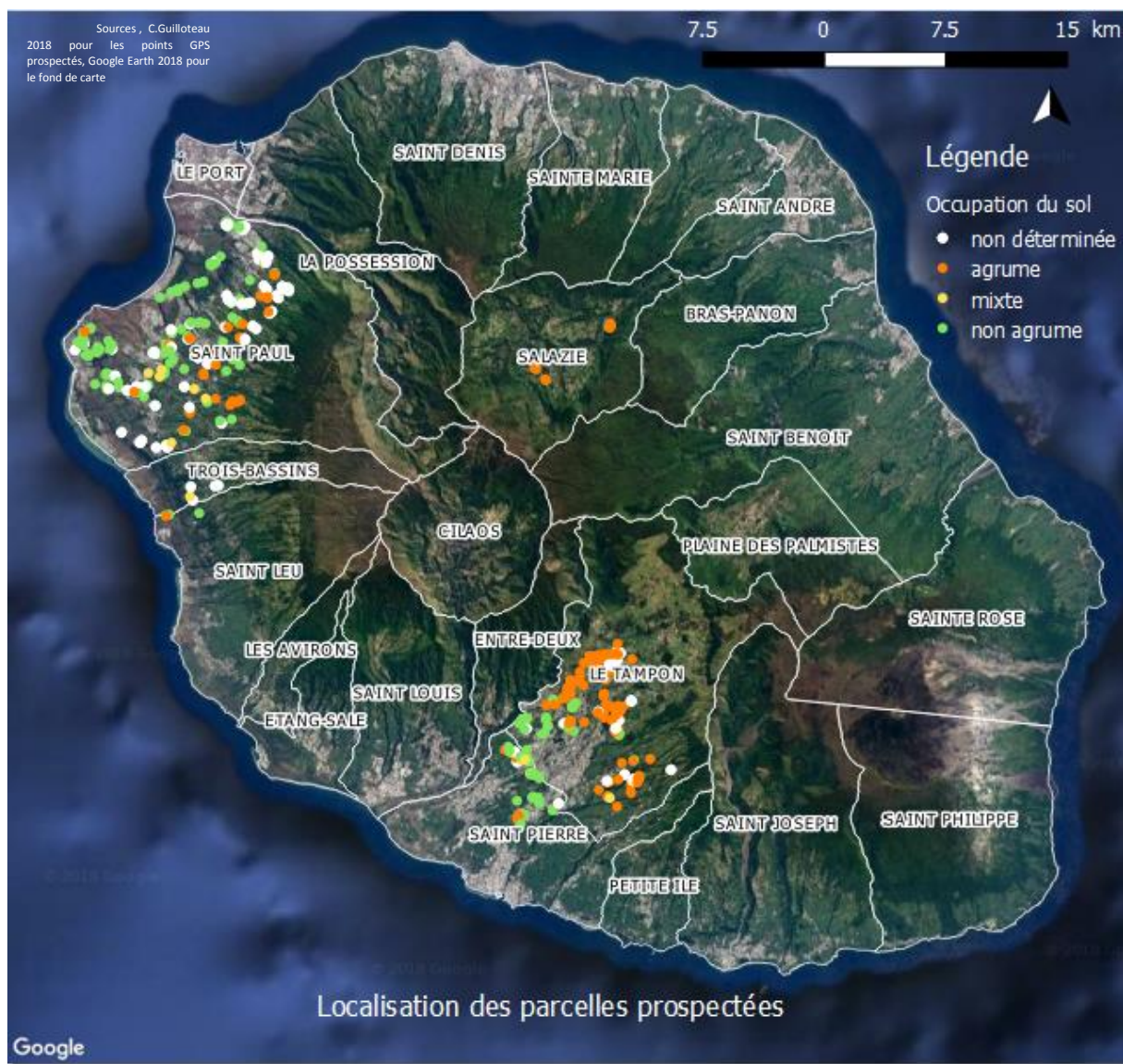


Figure 16 : Carte de localisation des parcelles prospectées sur le terrain et le type de culture qui y a été observé

Si on s'intéresse plus précisément aux superficies d'agrumes avant et après prospection, on constate que notre travail a permis de répertorier 35 nouveaux hectares d'agrumes (parcelles de vergers sans que l'orientation agrumicole soit précisée ou parcelles non tracées). En particulier, 21 ha de parcelles d'agrumes qui n'étaient pas référencées sur la commune du Tampon ont été ajoutés à la base de données, dont 10 ha de parcelles non tracées (figure 17). Nous avons trouvé très peu de parcelles entre Saint-Pierre et le Tampon mais ces quelques parcelles d'agrumes présentent un grand risque puisque ce sont généralement des parcelles abandonnées et peu entretenues, en mauvais état.

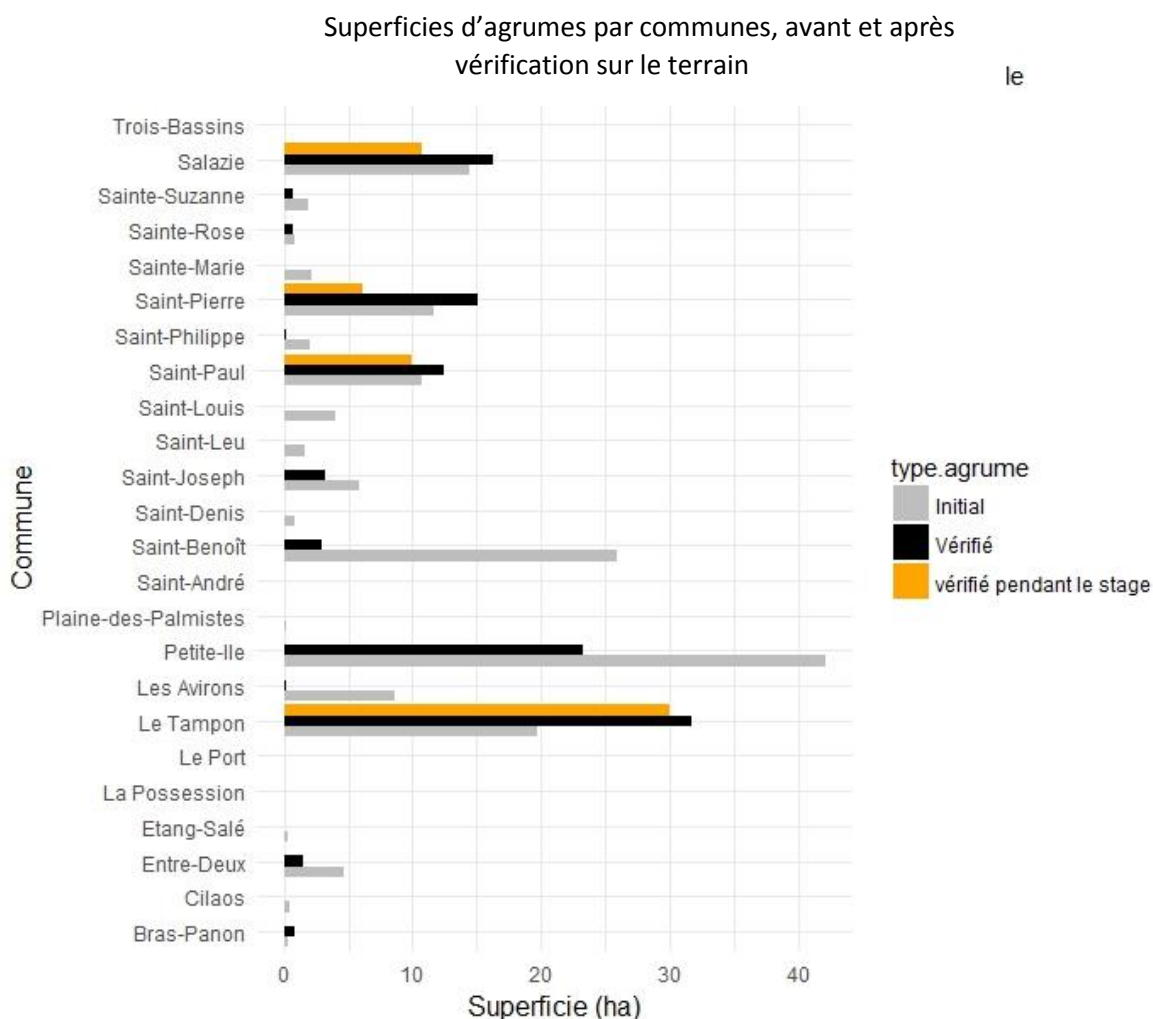


Figure 17 : Superficies d'agrumes par communes, avant et après vérification sur le terrain

Les prospections sur le terrain ont permis de mettre en évidence des zones de production qui n'étaient pas répertoriées jusque-là, par exemple dans les hauts du Tampon, à Piton Hyacinthe (figure 18). Parmi les nouvelles parcelles, certaines avaient été plantées récemment et les agriculteurs rencontrés n'étaient pas au courant de la présence du HLB sur l'île. De plus, nous avons pu observer dans cette zone des symptômes de la maladie à une altitude de 1200 m. L'ensemble de ces données a été transmis à la FDGDON qui les utilise pour organiser la surveillance du HLB dans ces zones.

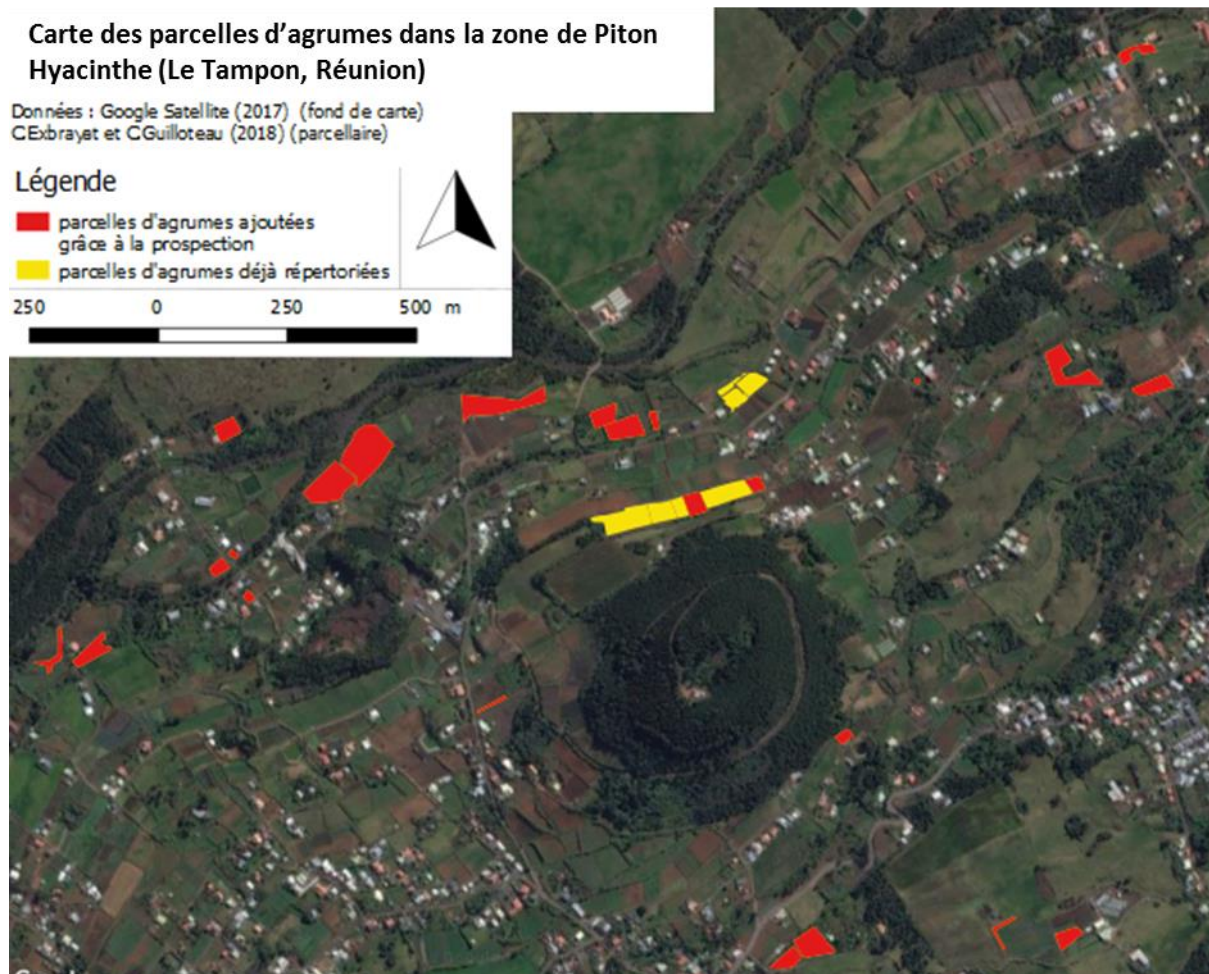


Figure 18 : Carte des parcelles d'agrumes ajoutées grâce aux prospections autour de Piton Hyacinthe

2.2.2) Correspondance entre les renseignements des bases de données initiales et les prospections réalisées

Pour la suite des résultats, les parcelles d'agrumes vérifiées sur le terrain désignent à la fois celles que nous avons prospecté au cours du stage, celles qui ont été prospectées par la FDGDON ainsi que celles des couches vérif Pruvost et Base fruit dont l'aspect sur les images satellites correspondait à celui de vergers d'agrumes.

Dans un premier temps, on peut remarquer que les parcelles d'agrumes indiquées s'avèrent être effectivement des vergers d'agrumes dans la majorité des cas (tableau 2)

Tableau 2 : Précision des bases de données initiales indiquant des parcelles d'agrumes

BD	Agrumes	Autres	% de justes
Base fruit	67	1	0,985
RPG	87	2	0,977
Vérif Pruvost	63	5	0,926

Etant donné que les bases de données n'avaient pas été actualisées avant la prospection, on peut supposer que les parcelles « Autres » (celles où nous n'avons pas vu d'agrumes sur le terrain) correspondent à des parcelles qui ont été arrachées depuis l'établissement de la base de données. Cela peut être le cas lorsqu'on observe des parcelles de canne à sucre ou de friches au lieu des vergers. En revanche, on retrouve parmi les erreurs des jardins créoles et une parcelle de manguier ou de letchis dont la nature n'a pas pu changer en quelques années.

Si peu d'erreurs étaient présentes dans les bases de données agrumes, on a en revanche 29 ha des parcelles classées en « vergers » qui se sont avérés être des agrumes lors des prospections. De même, parmi les parcelles repérées sur les images aériennes avant la prospection pour être ajoutées à la base de données, 34 ha se sont révélés être des vergers d'agrumes (figure 19).

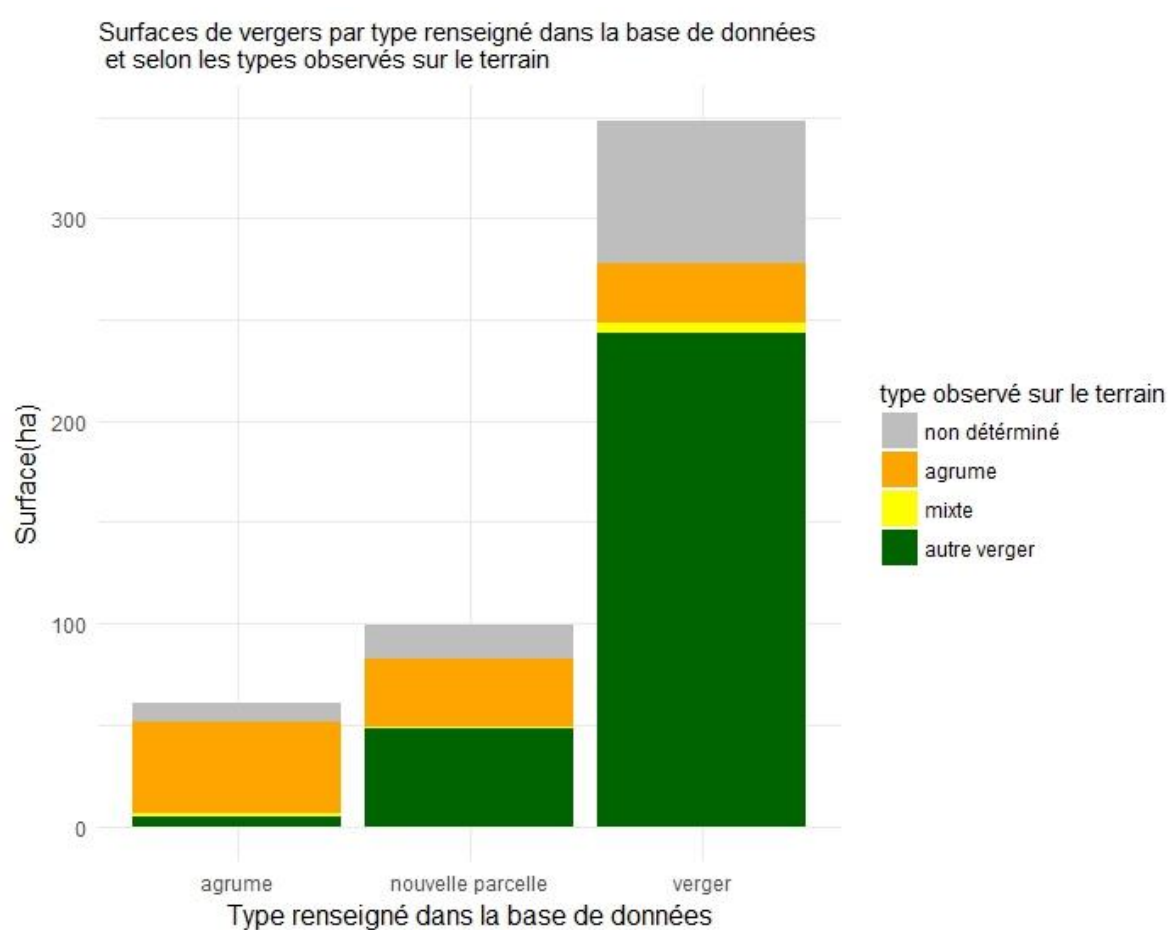


Figure 19 : Surfaces de vergers selon les types renseignés dans la base de données et observés sur le terrain.

Le type mixte correspond à des parcelles où sont plantés des agrumes en mélange avec d'autres arbres fruitiers

2.2.3) Apports potentiels du krigeage

J'ai testé la capacité du krigeage à classer les parcelles du Tampon et de Saint-Paul qui n'ont pas pu être déterminées sur le terrain (tableau 3).

Tableau 3 : Surfaces totales et estimées par le krigeage, en ha et par type de verger

Commune	Surface « agrume » prédite	Surface « agrume » totale	Surface « non agrume » prédite	Surface « non agrume » totale
Le Tampon	5,18	36,90	2,57	24,00
Saint-Paul	0	12,49	46,35	176,60

Lorsque l'on essaye de prédire les valeurs des parcelles pour lesquelles on connaît déjà la présence ou non d'agrumes, on peut calculer les écarts entre les valeurs prédites (continues entre 0 et 1) et réelles (0 ou 1). Ces écarts sont de l'ordre de 10^{-16} pour le Tampon et de 10^{-15} pour Saint Paul. La précision légèrement moins bonne pour Saint-Paul peut s'expliquer par le fait que 20 % des parcelles restait à déterminer contre seulement 10 % pour le Tampon.

On peut visualiser les résultats pour la commune du Tampon, avant et après le krigeage (figure 20) et en considérant que les parcelles pour lesquelles la valeur prédite est supérieure à 0,95 sont des agrumes.

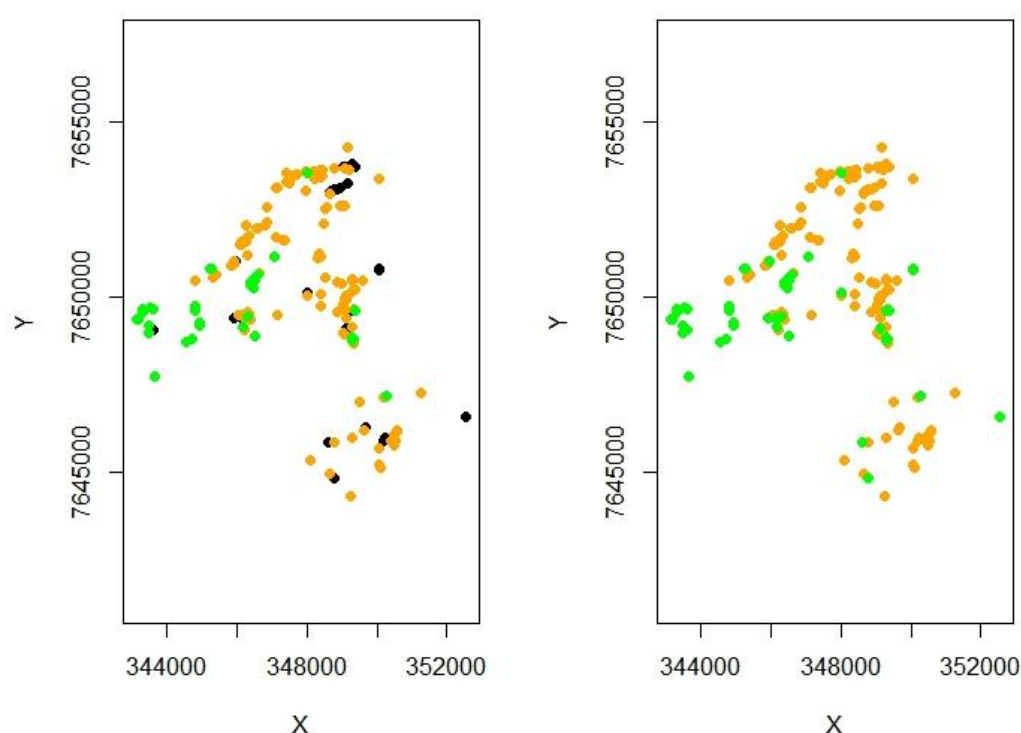


Figure 20 : Position des centroïdes des parcelles prospectées au Tampon, avant et après krigeage. Les points orange correspondent à des parcelles d'agrumes et les points verts à d'autres types d'occupation du sol. Les points noirs sur la figure de gauche correspondent aux parcelles pour lesquelles la présence ou non d'agrumes est estimée par le krigeage sur la figure de droite.

On remarque avec la figure 20 que les points indéterminés classés comme agrumes sont situés dans des zones comportant quasiment exclusivement des parcelles d'agrumes. A l'inverse, les points indéterminés situés à proximité de quelques parcelles d'agrumes mais plus éloignés ne sont pas catégorisés comme agrumes.

2.3) Indices de connectivité

2.3.1) Groupes de parcelles selon les distances seuil

Grâce au langage Ocelet, j'ai formé des groupes de parcelles distantes de moins d'une certaine distance seuil et ce pour plusieurs distances seuils. Il est également intéressant de visualiser les groupes formés afin de savoir s'ils ont des tailles homogènes ou non. Ainsi, si trois groupes sont formés, ils peuvent par exemple être équilibrés ou il peut exister un groupe comportant la totalité des parcelles à l'exception de deux isolées, représentant chacune un groupe. La figure 21 présente donc les groupes correspondant aux distances seuils de 7,5 et 10 km.

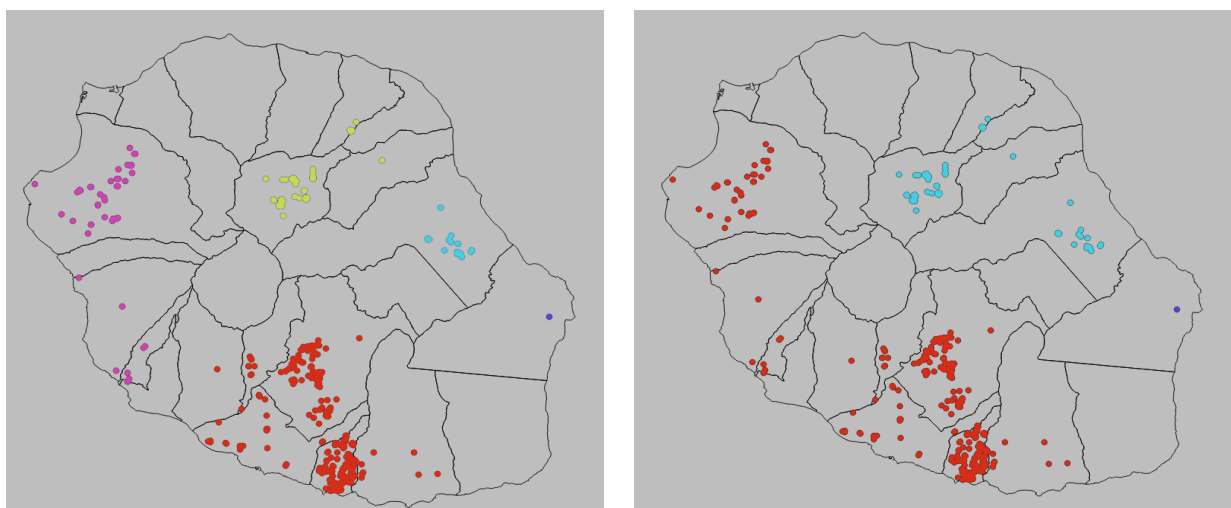


Figure 21 : Schéma des groupes de parcelles formés pour une distance seuil de 7,5 km et 10 km

On constate, qu'il existe un seuil pour une distance entre 7,5 et 10 km à partir duquel les deux groupes au sud de l'île d'une part et les deux au nord de l'île d'autre part se connectent. Les enjeux seront donc plus importants si le HLB peut facilement se propager à ou au-delà de cette distance seuil. Par ailleurs, cette séparation nord/sud semble d'autant plus pertinente que l'altitude plus élevée au centre de l'île peut renforcer cette séparation.

On peut noter la présence d'un point isolé à l'est de l'île et se demander si cet apparent isolement est lié à un manque de prospection dans cette partie de l'île. En faisant augmenter la distance seuil, il se rattache au groupe du nord (bleu cyan).

La figure 22 montre comment varie le nombre de groupes de parcelles formés en fonction de la distance seuil retenue. La longueur des portions de courbes horizontales représente la « solidité » du nombre de groupes correspondant en ordonnées. En effet, si on a des groupes identiques pour une large plage de distances, cela signifie que les groupes sont clairement séparés et que la distance entre ceux-ci est importante. Sur la figure 22, on observe un premier plateau entre 6,5 et 8,5 km et un second entre 9 et 12 km. On remarque également qu'à partir de 14,5 km, toutes les parcelles sont reliées et ne forment plus qu'un seul groupe. Cela signifie que si le HLB ou une autre maladie peut se propager à cette distance ou plus, il faut considérer qu'il n'existe qu'un seul bassin de production.

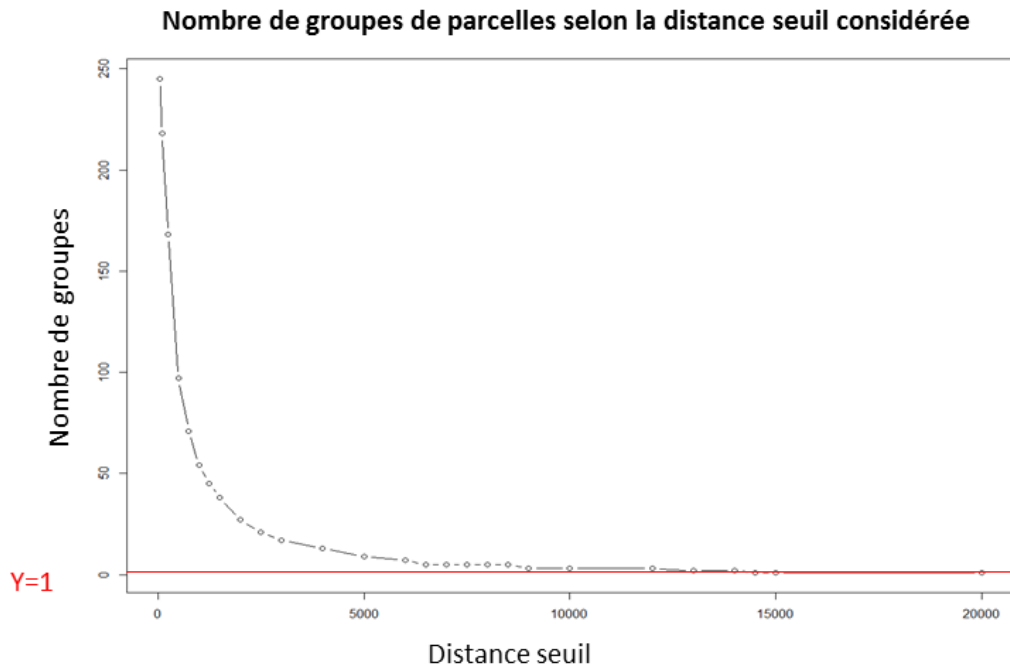


Figure 22 : Nombre de groupes de parcelles d'agrumes en fonction de la distance seuil entre les parcelles

2.3.2) Indice de la somme des inverses des distances (C)

Comme on peut le voir avec la figure 23, l'indice C correspondant à la somme des inverses des distances a des valeurs plus élevées pour les parcelles situées à Petite-Ile. Cela s'explique par le fait que les parcelles y sont proches et nombreuses car il s'agit de la principale zone agrumicole de l'île. Cet indice peut être plus intéressant à utiliser pour comparer les zones du Tampon et de Saint-Paul car l'effort d'échantillonnage qui y a été réalisé est similaire. On constate alors que selon cet indice, les parcelles sont plus connectées au Tampon qu'à Saint-Paul.

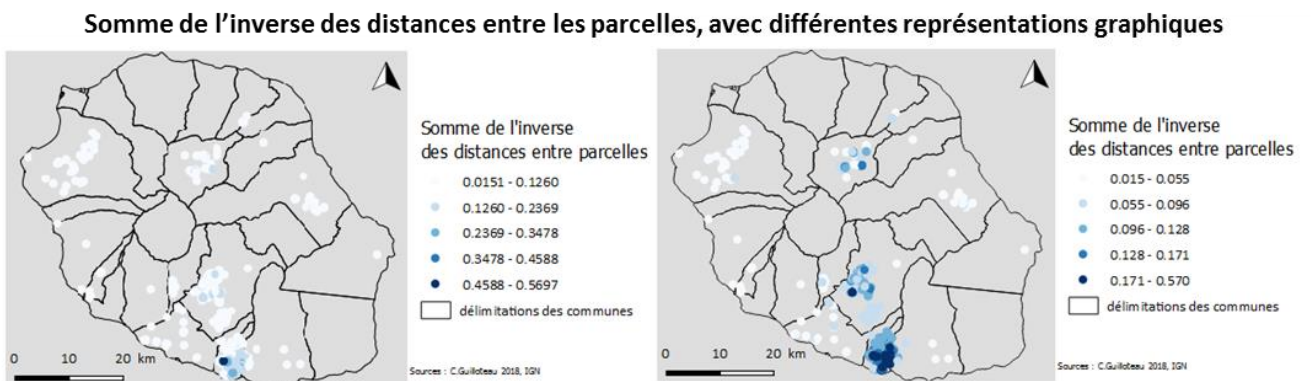


Figure 23 : Cartes des centroides des parcelles d'agrumes selon la valeur de la somme des inverses des distances. Les 5 intervalles de valeurs sont de même amplitude sur l'image de gauche et de même effectif sur celle de droite.

2.3.3) Indice des surfaces d'agrumes situées dans une zone tampon (T)

Comme pour les groupes de parcelles du 2.3.1, il n'y a pas de distance seuil évidente, j'ai donc testé plusieurs valeurs de distances seuil pour cet indice. Pour chaque distance seuil, la plage de valeur a été divisée en 10 intervalles égaux (figure 24).

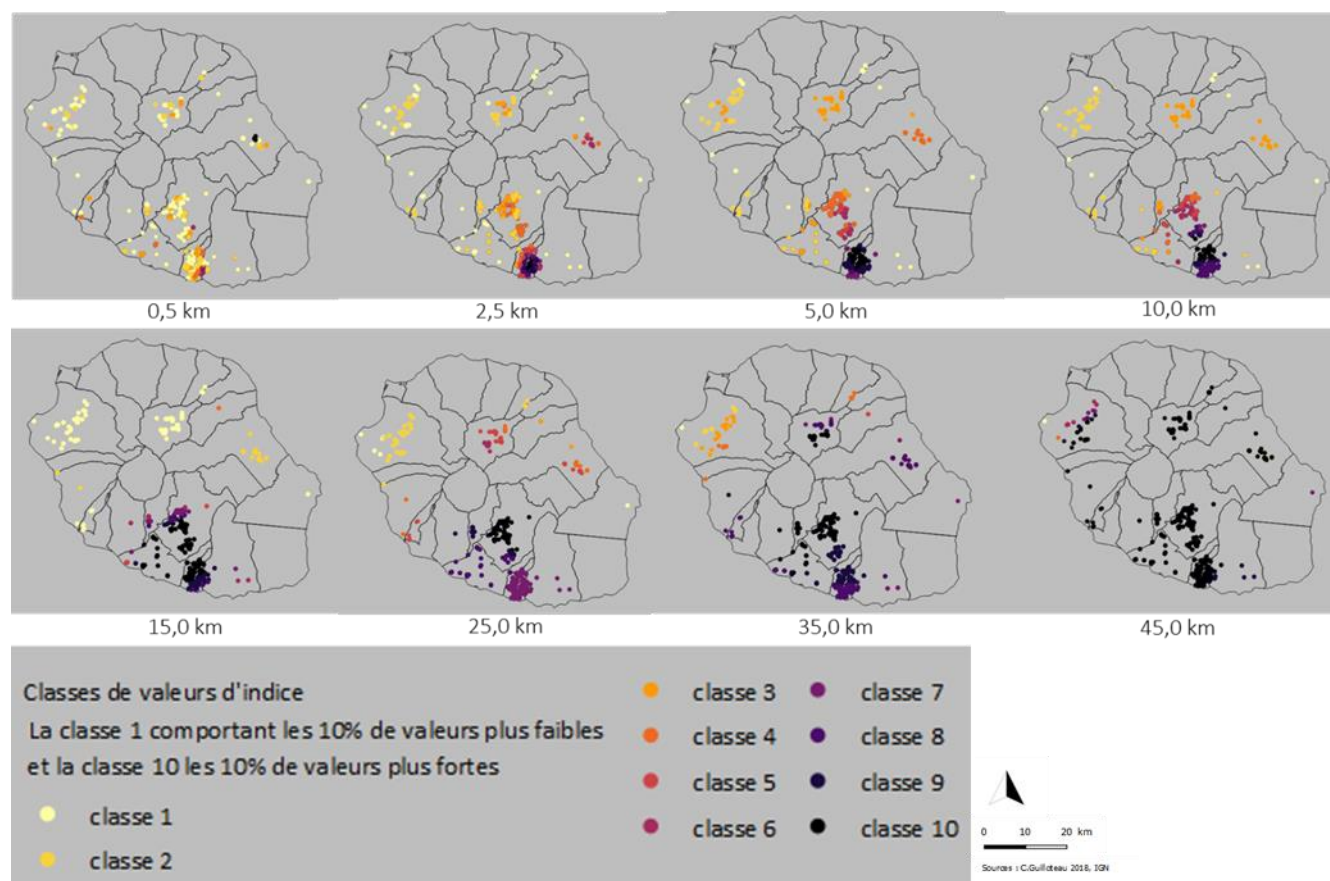


Figure 24 : Cartes de répartition des valeurs de T en fonction de la distance seuil considérée.

10 intervalles d'amplitude égale ont été réalisés à partir de la plage de valeurs prises, pour chaque distance seuil. La couleur noire correspond à l'intervalle de plus forte connectivité et le jaune pâle à celui de plus faible connectivité

On constate avec la figure 24 que si la zone la plus connectée varie selon la distance seuil considérée, la zone de Petite-Ile se détache comme étant particulièrement connectée. A l'inverse, la zone de Saint-Paul semble plus isolée.

Il faut cependant tenir compte de la forme circulaire de l'île qui influence les résultats. En effet, si on prend une distance seuil correspondant au rayon de l'île et que l'on considère une parcelle située au centre de l'île, on prend en compte la quasi-totalité de la surface de l'île alors que pour une parcelle située proche du littoral, ce sera une surface moindre qui sera considérée (figure 25).

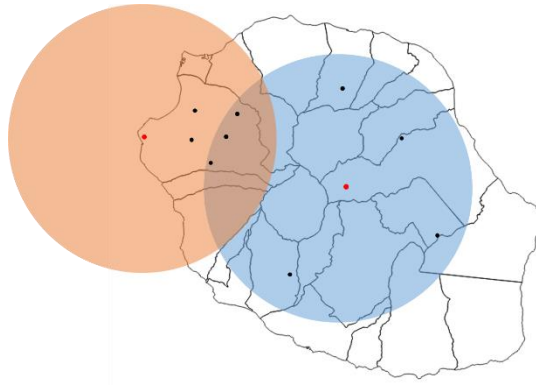


Figure 25 : Schéma présentant le biais que peut provoquer la forme de l'île sur le calcul de l'indice de connectivité T.

Les points rouges correspondent aux parcelles pour lesquelles on évalue la connectivité et les points noirs les autres parcelles. On peut voir que la zone dans le cercle rouge a une plus forte densité de points mais si on fait la somme des points contenus dans chaque cercle, elle en comporte 6 contre 8 pour celle dans le cercle bleu.

2.3.4) Indice de connectivité potentielle (PC)

J'ai calculé pour chaque parcelle un indice de connectivité prenant en compte le kernel de dispersion supposé du HLB. La figure 26 montre la répartition des valeurs de connectivité sur l'île et la figure 27 leur distribution. On peut constater avec la distribution qu'on obtient une majorité de faibles valeurs avec quelques rares valeurs plus élevées. On retrouve ce résultat avec la carte de la figure 26 : 452 des 475 parcelles d'agrumes considérées appartiennent à la première classe, celles correspondant à la plus basse connectivité. Les parcelles avec une plus forte connectivité sont toutes localisées à Petite-Ile à part une située au Tampon.

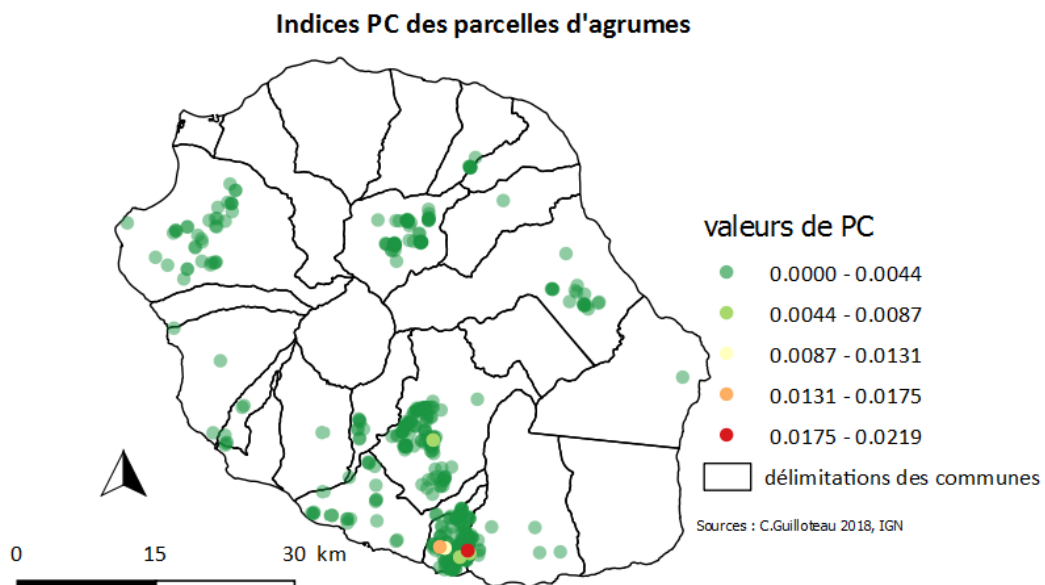


Figure 26 : Carte des centroïdes des parcelles d'agrumes selon leur indice de connectivité PC prenant en compte un kernel de dispersion.

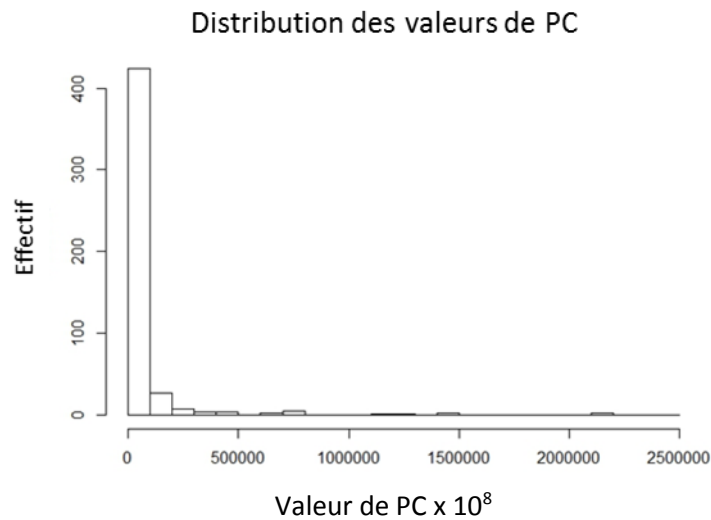


Figure 27 : Distribution des valeurs de PC des parcelles d'agrumes

Sur la figure 28 sont présentés les centroïdes des parcelles ayant les 50 valeurs de PC les plus élevées afin de mieux visualiser la localisation des parcelles de plus forte connectivité. Les valeurs de PC les plus fortes sont relevées à Petite-Ile, la principale zone de production. Quelques parcelles ressortent sur les communes du Tampon et de Salazie et on peut se demander si cela est lié à l'effort de terrain qui y a été mené. Cependant, des prospections ont aussi été effectuées sur la commune de Saint-Paul mais on n'y recense aucune des 50 parcelles avec une forte valeur de PC. La zone de Saint-Paul apparaît donc comme étant plus protégée et celle de Petite-Ile plus particulièrement vulnérable.

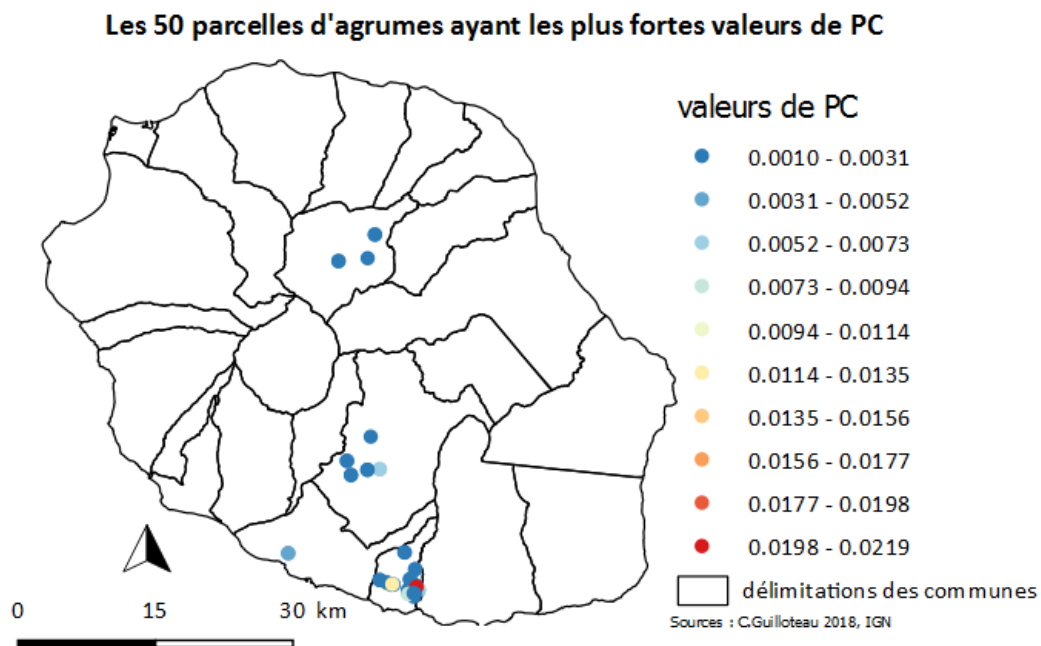


Figure 28 : Carte des 50 centroïdes de parcelles avec les plus forts indices de PC

2.4) Relation entre altitude et présence de la maladie sur la commune de Petite-Ile

Pour étudier la relation entre l'altitude et la présence de la maladie sur la commune de Petite-Ile, nous avons testé l'adéquation de trois modèles aux données. Les vraisemblances des modèles ainsi que leurs nombres de paramètres sont donnés dans le tableau 4. A titre d'information, je fournis également leur indice d'Akaike ou AIC (*Akaike Information Criterion*). L'AIC permet normalement d'opérer un choix de modèles en cherchant le meilleur compromis entre la vraisemblance du modèle, et le nombre de paramètres. Ici, les modèles ne sont pas emboîtés : ils n'ont pas été obtenus en enlevant des paramètres un à un à partir d'un modèle de départ. On opère le choix de modèle en se basant uniquement sur la vraisemblance.

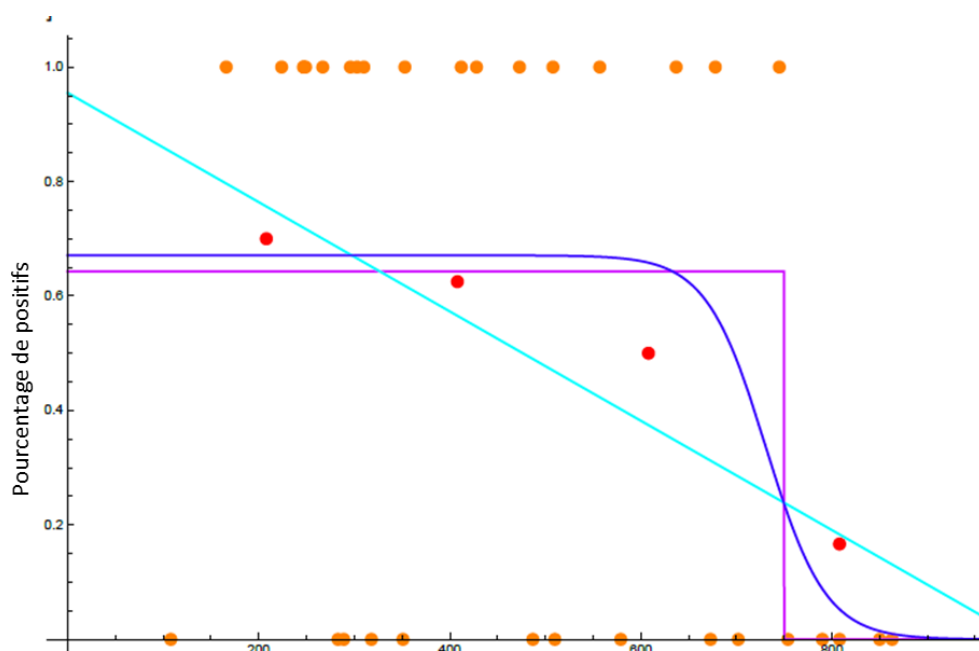


Figure 29 : Graphique des observations et des modèles testés pour étudier la présence de la maladie en fonction de l'altitude sur la commune de Petite-Ile.

Les points représentent les observations. En orange, chaque point représente le statut contaminé (1) ou non (0) d'une des 35 parcelles expertisées entre 2015 et 2017. En rouge, les points représentent les pourcentages de parcelles contaminées par tranche de 200 m d'altitude. Les lignes pleines représentent les trois modèles testés : en bleu clair, le modèle linéaire, en bleu foncé, le modèle sigmoïde et en violet le modèle en marche d'escalier.

On constate que la vraisemblance est plus forte pour le modèle en sigmoïde, qui est celui qui a le plus de paramètres. Ensuite, le modèle en marche d'escalier a une vraisemblance relativement proche du modèle en sigmoïde alors qu'il comporte un paramètre de moins. Le modèle linéaire, lui, a une vraisemblance plus faible d'un ordre de grandeur alors qu'il a le même nombre de paramètres que le modèle en marche d'escalier. Ce dernier modèle peut donc être écarté. Il est difficile de « choisir » entre les modèles sigmoïde et en marche d'escalier mais ceux-ci révèlent la même caractéristique des données : il semble exister une altitude seuil en dessous de laquelle il n'y a pas d'effet de l'altitude sur la probabilité de contamination des parcelles.

Tableau 4 : caractéristiques des différents modèles testés

Modèle	Nombre de paramètres p	Vraisemblance maximale V_{max}	AIC = $-2 \ln(V_{max}) + 2 p$
Modèle sigmoïde	3	6.43×10^{-8}	45
Modèle en marche d'escalier »	2	1.18×10^{-8}	40
Modèle linéaire	2	1.31×10^{-9}	42.3

Plus précisément, avec les estimations des paramètres du modèle en sigmoïde (figure 30), on constate que les valeurs des paramètres b et c sont significatives. Il existerait donc un seuil d'altitude même si son intervalle de confiance est de 250 m. En considérant un seuil de 731 mètres et les relevés effectués, on a 66% de tests positifs au HLB en dessous de ce seuil, contre 17% au-dessus. En revanche, la valeur du paramètre a n'est pas significative. Ce modèle ne fournit donc pas d'information sur le sens de la pente. Cependant, il paraît difficile d'expliquer biologiquement une prévalence augmentant avec l'altitude, au vu des caractéristiques des vecteurs.

<p>Intervalles de confiance des paramètres au seuil de 95%</p> <p>$a = 0.032$ [-0.04907749 ; 0.1126496]</p> <p>$b = 0.671$ [0.47104752 ; 0.8705074]</p> <p>$c = 731$ [608.35476397 ; 853.6895376]</p>
--

Figure 30 : Paramètres du modèle retenu et leurs intervalles de confiance

3) Discussion

3.1) Vers une meilleure connaissance du paysage agrumicole

3.1.1) Avancées réalisées et perspectives

Nos travaux ont permis de recenser 120 nouvelles parcelles d'agrumes, dont 82 au Tampon, ce qui représente une surface de 35 ha. La localisation des parcelles situées sur la commune du Tampon a été transmise à la FDGDON afin qu'elle puisse organiser plus efficacement les prospections à venir sur cette commune. Dans la même optique, il sera possible de continuer les prospections aux Makes (Saint-Louis) et à Saint-Benoît car on sait que ces zones comportent des vergers d'agrumes mais que leur cartographie est imprécise.

Par ailleurs, le contour des parcelles de vergers prospectées (agrumes et autres) et les espèces qui y sont cultivées ont été transmis à l'UMR TETIS afin d'alimenter une base d'apprentissage pour la télédétection. Celle-ci a pour but de pouvoir prédire l'occupation du sol à partir des images satellites. La précision des résultats a déjà été améliorée grâce aux nouvelles parcelles que nous avons fournies (S. Dupuy, comm. pers.)

Les différents indices de connectivité calculés mettent en évidence la présence d'un ensemble de parcelles plus connectées sur la commune de Petite-Ile et d'une zone où les parcelles d'agrumes semblent plus isolées, sur la commune de Saint-Paul. Au niveau local, on peut également utiliser les différences de connectivité (relatives) fournies par ces indices en les croisant avec les détections de HLB réalisées par la FDGDON. Ainsi, à Petite-Ile, de nombreux foyers positifs ont été recensés dans une zone de forte connectivité ce qui marque les enjeux présents dans cette zone (annexe 5). A Salazie, les deux prélèvements positifs au HLB réalisés en 2018 ont été suivis de l'arrachage des arbres concernés. Les arbres étant proches de parcelles avec de plus fortes connectivités *PC*, une intervention rapide était donc nécessaire afin d'éviter une propagation au reste des vergers jusqu'à maintenant indemnes (figure 31).

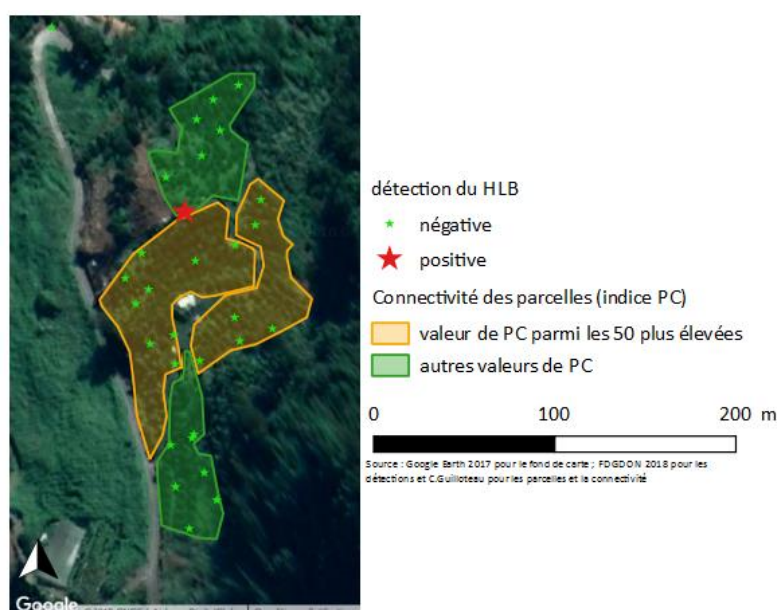


Figure 31 : Carte montrant les détections du HLB sur une exploitation de Salazie et l'indice de connectivité PC des parcelles

3.1.1) Limites concernant la méthodologie de réalisation de la base de données

Tout d'abord, lors des prospections sur le terrain, nous n'avons pas pu voir certaines parcelles car leur accès se fait par un chemin privé. Leur visibilité depuis les axes de circulation publics n'était pas toujours possible, à cause du relief vallonné ou de la présence de champs de canne à sucre. Réaliser des prospections après la récolte de la canne à sucre, en octobre-novembre, pourrait permettre une meilleure visibilité. Ces prospections seraient à réaliser en complément de prospections réalisées entre avril et juin, car la présence de fruits sur les arbres à cette période permet d'identifier plus facilement les différents types d'agrumes.

Ensuite, le repérage et le tracé des vergers à partir des images satellites sont limités par la qualité des images disponibles. Ainsi, la qualité des clichés est variable selon les images et des nuages empêchent parfois la visibilité. De plus, les reliefs créent des ombres qui peuvent masquer les parcelles, notamment dans le cirque de Salazie, entouré de parois abruptes. Enfin, lors du traçage ou du retraçage des parcelles, nous avons essayé procéder de la façon la plus précise possible mais il peut néanmoins exister une variabilité, notamment dans le choix à faire de la division ou non d'une parcelle en plusieurs sous-parcelles. Cela influe les calculs de distribution de superficie réalisés par la suite. Une nouvelle image satellite spot 5 datée de 2017 est disponible depuis peu. Elle permet une meilleure précision et pourra être utilisée pour des travaux futurs.

Les dates auxquelles sont pris les clichés constituent également une limitation pour la précision de notre base de données. Les dernières images disponibles sur Google Earth lors du stage dataient de l'été 2017 soit de presque un an. Lors des prospections, nous avons recensé plusieurs parcelles avec des arbres récemment plantés. Cela pose la question de la durabilité dans le temps de la base de données que nous avons réalisée : si les plantations de nouveaux agrumes sont courantes et l'évolution du parcellaire rapide, la possibilité de reconnaître les vergers par télédétection est d'autant plus attrayante à développer. Par ailleurs, j'ai essayé de déterminer des dates de début et de fin pour les vergers à partir des images plus anciennes mais la précision des images est variable selon les dates et ne permet pas toujours de savoir si un verger est planté à un endroit donné ou non. De plus, la fréquence des prises de vues avant 2015 est plus faible (une tous les 2-3 ans contre plusieurs par an). Enfin, les images satellites antérieures à 2003 sont plus difficilement accessibles (elles doivent être téléchargées sur Géoportail). L'âge des vergers ne peut donc pas être pris en compte pour le moment. Il s'agit néanmoins d'un paramètre intéressant à prendre en compte lors de la modélisation, puisqu'il influe sur le taux de transmission, la durée de la phase asymptomatique (Cunniffe *et al.*, 2015), ainsi que la durée de la période infectieuse (Aubert, 1987).

Plus généralement pour l'établissement de ces bases de données, la question de la définition d'une parcelle s'est posée. La définition la plus sensée en termes d'épidémiologie est celle d'un espace continu sur lequel est cultivée une culture unique et d'âge unique. Cependant, cette définition est compliquée à mettre en œuvre dans notre cas. En plus du problème de l'âge inconnu des parcelles déjà évoqué, ce sont souvent des mélanges de variétés qui sont utilisés. Des portions de parcelles ont parfois été arrachées pour être remplacées et certains agriculteurs utilisent les agrumes en bordure d'autres parcelles. Il peut donc être pertinent de travailler à l'échelle de l'exploitation pour contacter les agriculteurs et avoir ainsi de plus amples informations. Cela nécessite de résoudre les difficultés d'accès aux données et de confidentialité, particulièrement avec le nouveau règlement européen entré en vigueur sur la protection des données.

Une autre difficulté dans la réalisation d'une base de données sur les agrumes de la Réunion est la prise en compte des agrumes situés en dehors des vergers. En effet, ils se rencontrent également dans les jardins de particuliers, les jardins créoles étant constitués de nombreux arbres fruitiers, et peuvent servir de relai dans la transmission de la maladie. Une prospection chez les particuliers dans différents quartiers de la ville de Saint-Pierre a commencé à être effectuée par Corentin Exbrayat. Le but de cet échantillonnage est de pouvoir estimer quel pourcentage du couvert végétal en zone urbaine est composé d'agrumes. En utilisant le couvert végétal disponible à l'aide des images satellites, il sera ensuite possible d'extrapoler pour prendre en compte les agrumes des jardins créoles dans les modélisations.

3.1.2) Mieux comprendre la structure du paysage en intégrant de nouvelles données

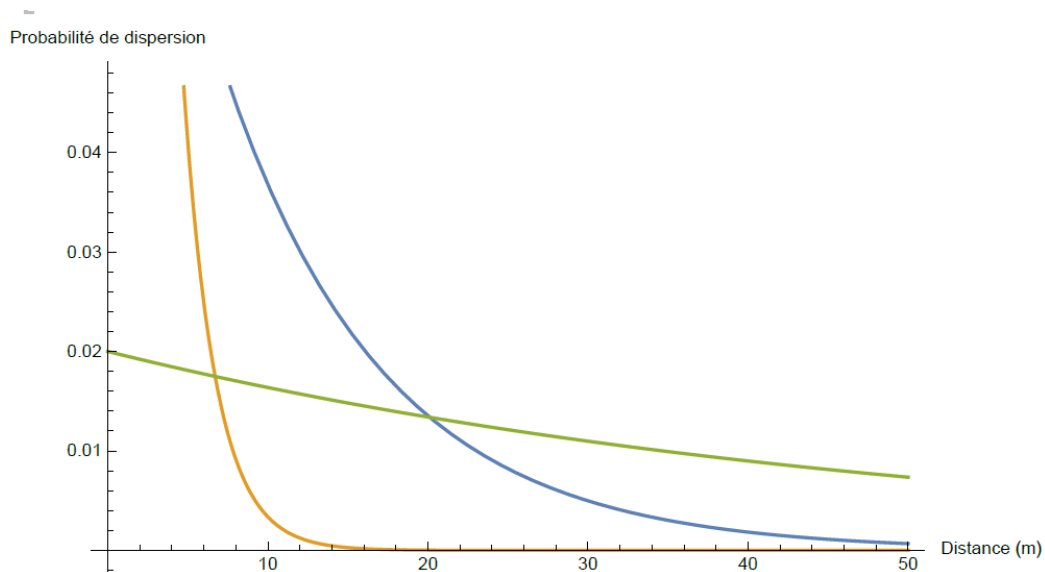
Le recensement par photo-interprétation et confirmation au terrain de toutes les parcelles de l'île se heurte à de nombreuses difficultés au premier rang desquelles l'inaccessibilité de certaines parcelles et la rapidité avec laquelle le paysage se renouvelle. Même pour un parcellaire aussi petit que celui des agrumes réunionnais, la tâche est immense. Le krigeage offre une possibilité, statistique, d'aller au-delà de cette approche, en prédisant quelles parcelles doivent être des agrumes à partir de ce que l'on sait déjà du paysage agrumicole. Dans ce stage nous avons utilisé uniquement les informations de position des parcelles. Prendre en compte les conditions éco-climatiques permettrait une meilleure compréhension. Par exemple, la prise en compte de l'altitude, donnée facilement relevable sur le terrain, pourrait permettre une meilleure précision des résultats lors du krigeage. En effet, nous avons pu constater avec les prospections que les vergers d'agrumes sont généralement situés à quelques centaines de mètres d'altitude, les vergers de plus basse altitude étant généralement des manguiers ou des litchis.

Le parcellaire résultant d'une opération de krigeage ne pourrait pas être utilisé tel quel pour des activités de surveillance sur le terrain. Cependant, il donne une version du paysage qui pourra être utilisée en complément de celle réalisée avec le terrain, pour simuler la propagation de la maladie. On peut en effet avancer que le paysage agrumicole réel est entre ces deux versions.

3.1.3) Affiner les estimations de connectivité par une meilleure prise en compte des capacités de dispersion des vecteurs

Comprendre la connectivité d'un paysage fragmenté est un vrai défi car cela nécessite de connaître à la fois la structure du paysage et les modes de propagation des organismes ciblés. Le HLB se répand au moyen de plusieurs vecteurs : deux espèces de psylles et l'homme au travers de ses pratiques agricoles (taille, entretien des parcelles, échange de plants, de greffons, vente de plants infectés). Il n'existe pas à ce jour d'estimation satisfaisante des capacités de propagation que ces modes de dispersion confèrent en combinaison au HLB, et donc aucune qui puisse s'appliquer à la Réunion.

La seule estimation qui s'en approche a été obtenue lors d'une épidémie dans des jardins de particulier dans des vergers en Californie (Parry *et al.*, 2014). Pour simplifier, nous avons utilisé un kernel de dispersion correspondant à des arbres d'âge moyen (10-20 ans) et qui s'approche d'une exponentielle de paramètre 10 m/jour. Mais cette étude mentionne également que le paramètre peut varier en fonction de l'âge des arbres. Or, le choix de la valeur de α modifie le kernel de dispersion et donc l'indice de connectivité calculé (figure 32)



*Figure 32 : probabilités de dispersion selon la distance pour plusieurs valeurs de α
 Courbe orange : $\alpha = 2$; courbe bleue : $\alpha = 10$; courbe verte : $\alpha = 50$ (en m/jour)*

Les résultats que nous avons obtenus devront donc être affinés et il serait pour cela nécessaire de prendre en compte de façon plus précise les caractéristiques de la propagation du HLB afin de calculer des indices de connectivité et simuler la propagation de façon plus pertinente. Par ailleurs, des indices de connectivité prenant en compte des paramètres influant sur la densité des vecteurs pourraient être pris en compte. L'altitude par exemple, serait pertinent au vu de la géographie de l'île. On peut en effet supposer que la présence de cirques et de remparts modifie la propagation de la maladie par rapport à un relief plat. D'autres paramètres, moins faciles à recenser pourront également être utilisés. Par exemple, la présence d'agrumes de jardins et de haies de murrays influent positivement la densité des vecteurs dont ils sont les hôtes mais ne sont pas cartographiés à ce jour. À l'inverse, certaines pratiques agricoles peuvent diminuer la densité des vecteurs en attirant les parasitoïdes (enherbement, absence de pesticides) ou limiter sa propagation (haies brise vent). Enfin, des interactions possibles avec d'autres maladies des agrumes (chancre citrique et tristezza) complexifieront la tâche de l'estimation de la connectivité.

Malgré ces limitations, nos travaux fournissent néanmoins des données pouvant contribuer à la gestion du HLB à la Réunion. Ainsi, nous avons pu fournir à la FDGDON une liste des 50 parcelles les plus connectées qui restera globalement stable, même en affinant les calculs de connectivité. Ces données seront donc utiles pour organiser les campagnes de surveillance efficacement. Par ailleurs, nous avons mis en évidence la déconnexion des vergers d'agrumes de Saint-Paul. Il faut donc s'attacher à les protéger, par exemple en y utilisant des plants certifiés. Enfin, si les valeurs des indices de connectivité calculés n'ont pas de signification biologique, j'ai pu calculer un ordre de grandeur de la capacité de dispersion à partir duquel toutes les parcelles d'agrumes de l'île sont connectées. Celui-ci est de 15 km et est applicable quelle que soit la maladie. Cette distance est relativement faible et les échanges entre les différentes zones de l'île (vente de plants, cyclones) se font souvent à des distances supérieures. Cela signifie que la gestion d'une maladie doit se faire de façon globale et pas seulement sur une zone de l'île.

3.1.4) Liens entre l'altitude et la présence du HLB : quel zonage adopter ?

Un zonage a été proposé en comité de pilotage et lors des CROPSAV. Il définit une zone « rouge » en dessous de 400 m dans laquelle la maladie est très présente, une zone intermédiaire entre 400 m et 600 m où la maladie est présente mais non installée et une zone « verte », au-delà de 600 m d'altitude dans laquelle le HLB n'est pas une menace et où aucune mesure spécifique n'est à envisager. Cependant, les résultats que nous avons obtenus montrent qu'il existe bien un seuil au-delà duquel la prévalence du HLB est moins forte mais celui-ci se situerait aux alentours de 750 m. De plus, les parcelles situées au-delà de cette altitude peuvent tout de même être positives et il n'existe pas de différence de taux de contamination détectable entre les très basses altitudes et les altitudes intermédiaires. Des symptômes du HLB (non confirmés par PCR) ont par ailleurs été observés jusqu'à 1200 m. Même si ces résultats mériteraient d'être affinés en utilisant des jeux de données plus importants, la zonation proposée apparaît donc ne pas être en lien avec les données disponibles. On peut donc se poser la question de sa pertinence pour la gestion du HLB.

3.2) La gestion du HLB à la Réunion

3.2.1) Interactions entre les acteurs

La communication entre les acteurs de la recherche, de la surveillance et de la gestion est un élément clé dans la réussite de la gestion de crises sanitaires comme celle du HLB à la Réunion et nécessite de centraliser et de croiser les informations entre tous les acteurs de la surveillance. Cependant, il est très surprenant de constater le niveau de complémentarité des données cartographiques des différents instituts impliqués. Cette complémentarité a constitué une chance pour nous mais elle révèle aussi à quel point les données détenues par chaque organisme sont incomplètes et le peu de communication qu'il y a eu jusqu'à présent sur ce sujet. Ce stage a contribué à renforcer les liens entre certains acteurs, notamment le Cirad, la DAAF et la FDGDON, au travers de l'échange de données et d'interprétations. La FDGDON nous a notamment fait parvenir toutes les données de détection du HLB en temps réel et nous avons fourni nos informations de cartographie et des interprétations issues de nos analyses en appui aux comités de pilotage. Cependant, cette réussite est fragile dans un contexte où la surveillance est très peu financée et où les enjeux économiques et politiques sont forts.

Ce stage a aussi fait apparaître de façon criante (mais peu mesurable) que la communication vers les agriculteurs doit être améliorée pour pouvoir gérer la maladie efficacement. Ce problème a été signalé par la FDGDON lors d'un comité de pilotage et nous avons pu constater lors de nos prospections que les agriculteurs que nous rencontrions étaient rarement au courant de l'existence de la maladie. Contrairement aux Antilles, il n'existe pas de filière agrume à la Réunion, il y est donc plus difficile de contacter l'ensemble des agrumiculteurs. Cependant des outils comme les bulletins de santé du végétal (BSV), des fiches explicatives sur la lutte contre le HLB ou des simulations comme celles de Webidemics (Cunniffe *et al.*, 2015) peuvent être développés pour informer et sensibiliser les acteurs et améliorer ainsi la gestion de l'épidémie (Rimbaud *et al.*, 2015).

3.2.2) Perspectives

Pour continuer une production d'agrumes malgré la présence du HLB, il est possible de placer les cultures sous filets et ainsi empêcher la contamination des arbres. Des simulations pourront permettre de tester les effets de cette option de gestion, ainsi que celle de la lutte contre les psylles. La culture de vergers haute densité peut également être envisagée. Ceux-ci sont destinés à produire sur une courte période, avant que les arbres ne dépérissent à cause de la maladie. Cependant, ces possibilités supposent des coûts et on peut se demander s'ils sont compatibles avec le fait que l'agrumiculture réunionnaise est souvent considérée par les agriculteurs comme une culture périphérique ne demandant pas d'investissements financiers et de main d'œuvre importants. Des cultures de remplacement peuvent également être envisagées.

Néanmoins, travailler sur l'épidémiologie du paysage peut également bénéficier à d'autres problématiques, d'autant plus que les pathologies végétales sont nombreuses en climat tropical (flétrissement bactérien, cercosporiose du bananier...)

Conclusion

Mon travail au cours de ce stage a permis d'améliorer les connaissances sur le paysage agrumicole réunionnais. Une base de données plus précise du parcellaire agrumicole a été réalisée et a notamment bénéficié d'ajouts de parcelles grâce aux prospections que nous avons effectuées dans certaines zones de l'île (Le Tampon, Saint-Paul). Ces données serviront pour des modélisations à venir de la propagation du HLB, à la mise en place de la télédétection des vergers mais pourront également être utiles à la FDGDON pour lutter contre le HLB.

La description de la structure du paysage que j'ai réalisé donne une première approche de la connectivité des différentes zones agrumicoles de l'île. L'extrapolation des données par krigeage et le lien entre l'altitude et la présence du HLB sont également des pistes qui pourront être explorées plus en détails, notamment à l'occasion d'une thèse qui débutera à l'automne 2018 sur la modélisation du paysage agricole et de la dynamique des bioagresseurs de cultures pour l'accompagnement des réseaux d'épidémio-surveillance en l'appliquant au paysage agrumicole réunionnais.

Si ces travaux pourront à terme aider à gérer le HLB plus efficacement, un engagement fort des différents acteurs à tous les niveaux sera néanmoins nécessaire. Une gestion de la maladie reste cependant possible en mettant en place d'importants moyens, comme le prouvent des exemples au Brésil et en Chine (Bové, 2006).

Abréviations-sigles

CAC : conformité agricole communautaire

Cirad : centre de coopération Internationale en recherche agronomique pour le développement

CROPSAV : conseil régional d'orientation de la politique sanitaire animale et végétale

DAAF : direction régionale de l'alimentation, de l'agriculture et de la forêt

FDGDON : fédération départementale des groupements de défense contre les organismes nuisibles

RPG : registre parcellaire graphique

SIG : système d'information géographique

Bibliographie

Aubert, B. 1992. Citrus greening disease, a serious limiting factor for citriculture in Asia and Africa.

Aubert, B. 1987. le greening, une maladie infectieuse des agrumes, d'origine bactérienne, transmise par des Homoptères psyllidés.

Aubert, B., Grisoni, M., Villemin, M. & Rossolin, G. 1996. A Case Study of Huanglongbing (Greening) Control in Reunion. *Thirteen. IOCV Conf.* 276-278.

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. *Int. Organ. Citrus Virol. Conf. Proc.* 9.

Avon, C. & Bergès, L. 2014. Outils pour l'analyse de la connectivité des habitats. 1-33.

Bové, J.M. 2006. Huanglongbing : a Destructive , Newly-Emerging , Century-Old Disease of Citrus. *J. Plant Pathol.* **88**: 7-37.

Calabrese, J.M. & Fagan, W.F. 2004. A comparison-shopper 's guide to connectivity metrics. *Front. Ecol. Environ.* **2**: 529-536.

Callies, T. 2018. Using Kaolin Against HLB-Spreading Psyllids. Disponible à <http://citrusindustry.net/2018/01/02/using-kaolin-hlb-spreading-psyllids/> [Consulté le 18/07/2018]

Cameron, A.R. 2012. The consequences of risk-based surveillance: Developing output-based standards for surveillance to demonstrate freedom from disease. *Prev. Vet. Med.* **105**: 280-286. Elsevier B.V.

Commune de Petite Ile. 2016. L'agriculture, une richesse petite-iloise. Disponible à <http://www.petite-ile.re/index.php?langue=fr&article=1210> [Consulté le 25/08/2018]

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 Comput. Biol.* **11**: 1-24.

DAAF-La Réunion. 2014. La production fruitière à la Réunion. *Agreste la Réunion* **92**: 12.

DAAF. 2018. Compte rendu du CROPSAV section spécialisée végétale.

Degenne, P. & Lo Seen, D. 2016. Ocelet: Simulating processes of landscape changes using interaction graphs. *SoftwareX* **5**: 89-95. Elsevier B.V.

Dupré, M., Michels, T. & Le Gal, P.Y. 2017. Diverse dynamics in agroecological transitions on fruit tree farms. *Eur. J. Agron.* **90**: 23-33. Elsevier.

Dupuy, S., Londoño, M., Lebourgeois, V., Le Maire, G., Tran, A. & Gaetano, R. 2017. Cartographie de l'occupation du sol agricole à la Réunion utilisation d'images gratuites et de logiciels libres. *Rencontres Géomatique Réunion* 1-14.

- Équipe de développement de QGIS. 2016. Système d'information géographique QGIS. Open Source Geospatial Foundation Project. <https://www.osgeo.org>
- Facon, B. & David, P. 2006. Metapopulation Dynamics and Biological Invasions: A Spatially Explicit Model Applied to a Freshwater Snail Predicting the spatial spread of introduced species has become a critical task for ecologists (Shigesada and Ka. *Am. Nat* **168**: 769-783.
- Gottwald, T.R. 1989. Preliminary Analysis of Citrus Greening (Huanglongbing) Epidemics in the People's Republic of China and French Reunion Island. *Phytopathology* **79**: 687.
- Grenfell, B. & Harwood, J. 1997. (Meta)population dynamics of infectious diseases. *Trends Ecol. Evol.* **12**(10): 395-399.
- Hanski, I. 1998. Metapopulation dynamics. *Nature* **396**: 2005-2007.
- Keremane, M.L., Ramadugu, C., Rodriguez, E., Kubota, R., Shibata, S., Hall, D.G., *et al.* 2015. A rapid field detection system for citrus huanglongbing associated « Candidatus Liberibacter asiaticus » from the psyllid vector, Diaphorina citri Kuwayama and its implications in disease management. *Crop Prot.* **68**: 41-48. Elsevier Ltd.
- Kermack, W.O. & McKendrick, A.G. 1991. Contributions to the mathematical theory of epidemics-I. *Bull. Math. Biol.* **53**: 33-55.
- Le Préfet de la Réunion. 2016. arrêté relatif aux mesures de lutte contre la maladie du Huanglongbing ou HLB (« Citrus greening bacterium » ou « Candidatus Liberibacter spp. ») dans le département de La Réunion.
- 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. *Proc. Natl. Acad. Sci.* **112**: 7605-7610.
- Levins, R. 1969. Some demographic and genetic consequences of environmental heterogeneity for biological control. *American Entomologist*, *15*(3), 237-240.
- Maillot, A. 2017. Rapport de stage : Consolidation d'une base de données géoréférencées des vergers d'agrumes à la Réunion. Stage de fin d'études 2^{ème} année DUT Génie Biologique.
- Meentemeyer, R.K., Haas, S.E. & Václavík, T. 2012. Landscape Epidemiology of Emerging Infectious Diseases in Natural and Human-Altered Ecosystems. *Annu. Rev. Phytopathol.* **50**: 379-402.
- Moilanen, A. & Nieminen, M. 2002. Simple connectivity measure in spatial ecology. *Ecology* **83**: 1131-1145.
- Narouei-Khandan, H.A., Halbert, S.E., Worner, S.P. & van Bruggen, A.H.C. 2016. Global climate suitability of citrus huanglongbing and its vector, the Asian citrus psyllid, using two correlative species distribution modeling approaches, with emphasis on the USA. *Eur. J. Plant Pathol.* **144**: 655-670.
- Papaïx, J., Touzeau, S., Monod, H. & Lannou, C. 2014. Can epidemic control be achieved by altering landscape connectivity in agricultural systems? *Ecol. Modell.* **284**: 35-47. Elsevier B.V.
- Parnell, S., van den Bosch, F., Gottwald, T. & Gilligan, C.A. 2017. Surveillance to Inform Control of Emerging Plant Diseases: An Epidemiological Perspective. *Annu. Rev. Phytopathol.* **55**: annurev-phyto-080516-035334.
- Parry, M., Gibson, G.J., Parnell, S., Gottwald, T.R., Irey, M.S., Gast, T.C., *et al.* 2014. Bayesian inference for an emerging arboreal epidemic in the presence of control. *Proc. Natl. Acad. Sci.* **111**: 6258-6262.
- R Development Core Team. 2005. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL: <http://www.R-project.org>.
- Rimbaud, L., Dallot, S., Gottwald, T., Decroocq, V., Jacquot, E., Soubeyrand, S., *et al.* 2015. Sharka Epidemiology and Worldwide Management Strategies: Learning Lessons to Optimize Disease Control in Perennial Plants. *Annu. Rev. Phytopathol.* **53**: 357-378.
- Sauvion, N. 2018. Les psylles vecteurs des liberibacters responsables du huanglongbing : Taxonomie, distribution géographique, spécificité d'interaction insecte-plante-pathogène. Rapport ANSES, saisine n°2016-SA-0235.

Soti, V., Chevalier, V., Maura, J., Begue, A., Lelong, C., Lancelot, R., *et al.* 2013. Identifying landscape features associated with Rift Valley fever virus transmission, Ferlo region, Senegal, using very high spatial resolution satellite imagery. *Int. J. Heal. Geogr. [Electronic Resour.* **12**: 10.

Wolfram Research, Inc., Mathematica, Version 11.3, Champaign, IL (2018)

Sources des images

Figure 2 :

-Trois fruits, ermi, 09/02/2008. Disponible à :
à :https://fr.wikipedia.org/wiki/Tangor#/media/File:Photo_ortanique.JPG [Consulté le 20/07/2018]

-Combava : One Kaffir Lime, Alpha, 11/06/2011. Disponible à :
<https://www.flickr.com/photos/avlxyz/5820525361> [Consulté le 20/07/2018]

Figure 3 : Camille Guilloteau, avril 2018

Figure 4 :

-Citrus psyllid, hand sanitizer, adult, ft detrack_2014-05-01-09.43.40 ZS PMax, USGS Bee Inventory and Monitoring Lab, 01/05/2014. Disponible à :
[https://lv.wikipedia.org/wiki/Diaphorina_citri#/media/File:Citrus_psyllid,_hand_sanitizer,_adult,_ft_detrack_2014-05-01-09.43.40_ZS_PMax_\(15234786967\).jpg](https://lv.wikipedia.org/wiki/Diaphorina_citri#/media/File:Citrus_psyllid,_hand_sanitizer,_adult,_ft_detrack_2014-05-01-09.43.40_ZS_PMax_(15234786967).jpg) [Consulté le 20/07/2018]

-Trioza erytrea, fundanea, janvier 2018. Disponible à : <http://fundanea.org.ar/wp-content/uploads/2018/01/Trioza.jpg> [Consulté le 20/07/2018]

-Murraya paniculata ('olive) on Tongatapu 07/04/2017. Disponible à :
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Murraya_paniculata.jpg [Consulté le 20/07/2018]

Annexes

- Annexe 1 : Cartes topographique et des précipitations sur l'île de la Réunion

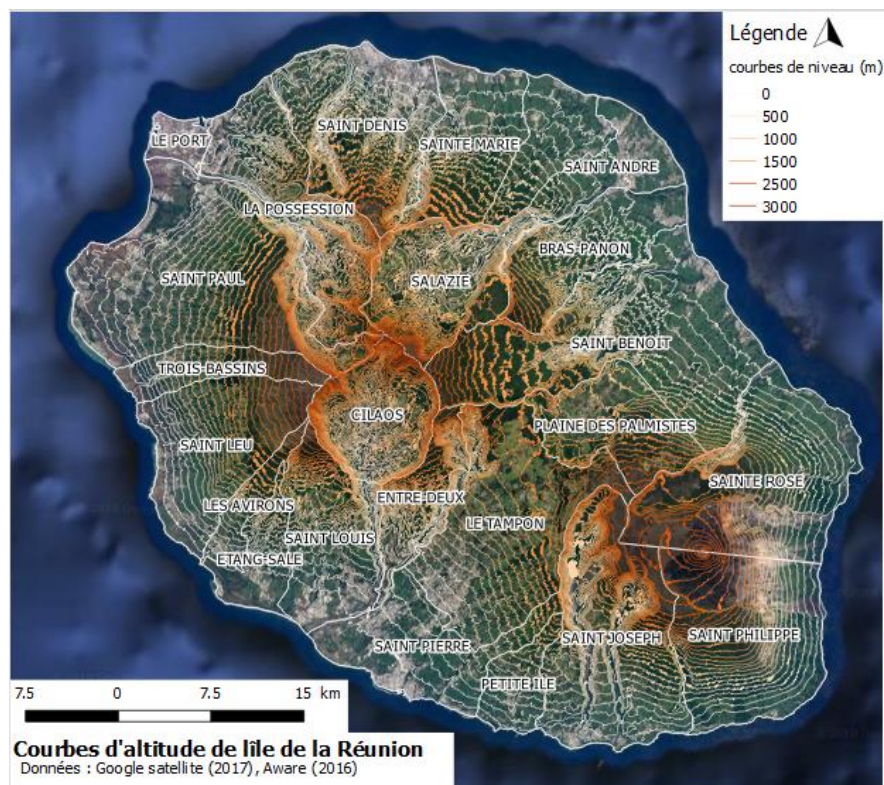


Figure a.1 : Carte des courbes d'altitude de l'île de la Réunion

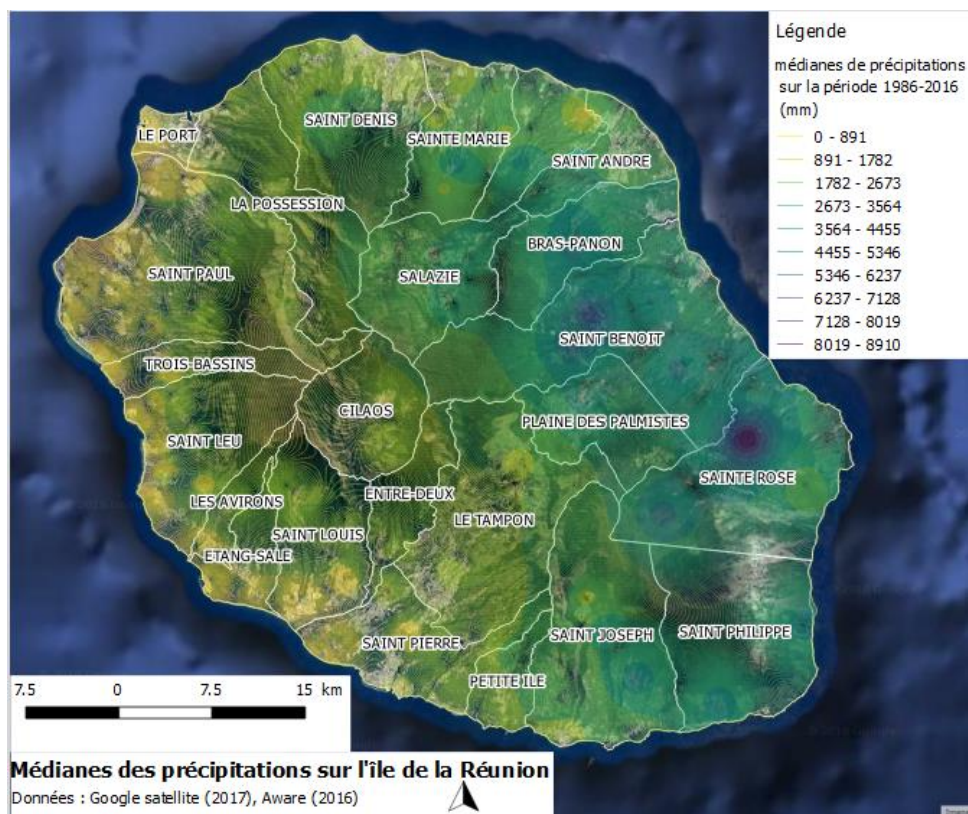


Figure a.2 : Carte des médianes des précipitations sur l'île de la Réunion

- **Annexe 2 : exemples de photo-interprétation**



Figure a.3 : différents aspects que peuvent présenter les vergers d'agrumes sur les images satellites. (Le Tampon, échelle 1 :2 500, d'après les images Google Earth, 2017)



Figure a.4 : comparaison des aspects que peuvent présenter les vergers d'agrumes (en orange) et de mangue (en rouge) sur les images satellites. (Saint-Pierre, échelle 1 : 4 000, d'après les images Google Earth, 2017)



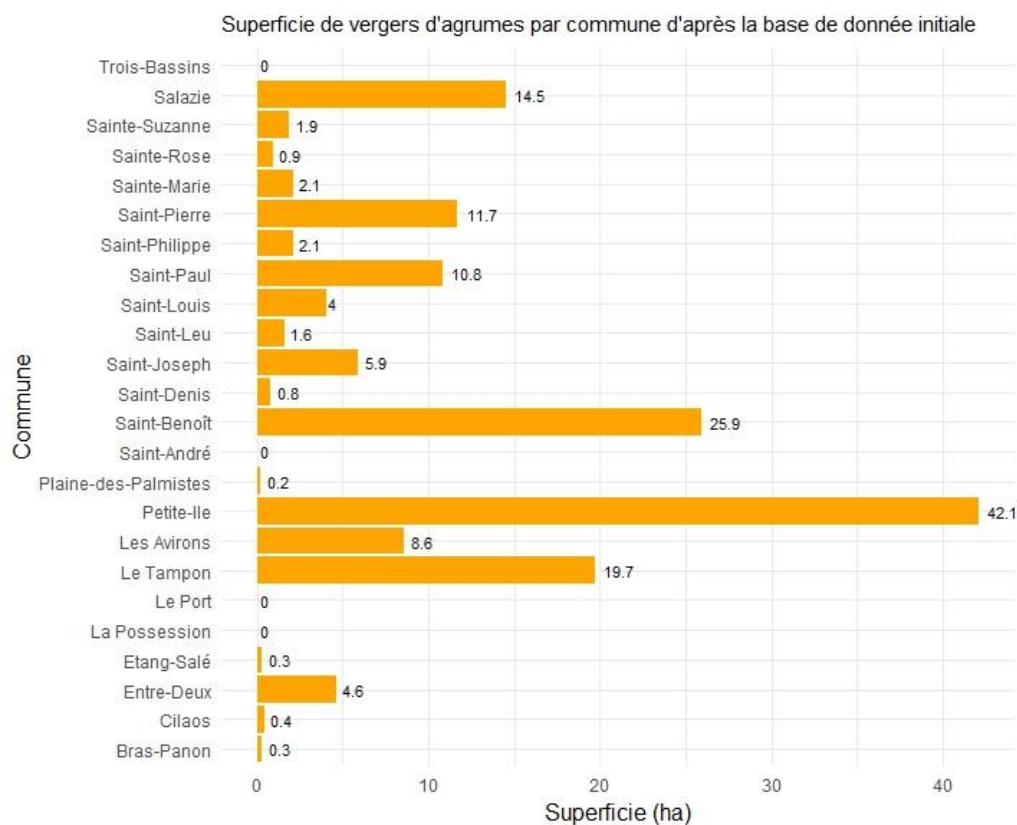
Figure a.5 : Exemple de vergers de mangues âgés pouvant être confondus avec de la forêt (Saint-Paul, échelle 1 : 2 000, d'après les images Google Earth, 2017)

- Annexe 3 : champs de la table attributaire de la base de données, le type et les valeurs prises par les différents champs et leur signification

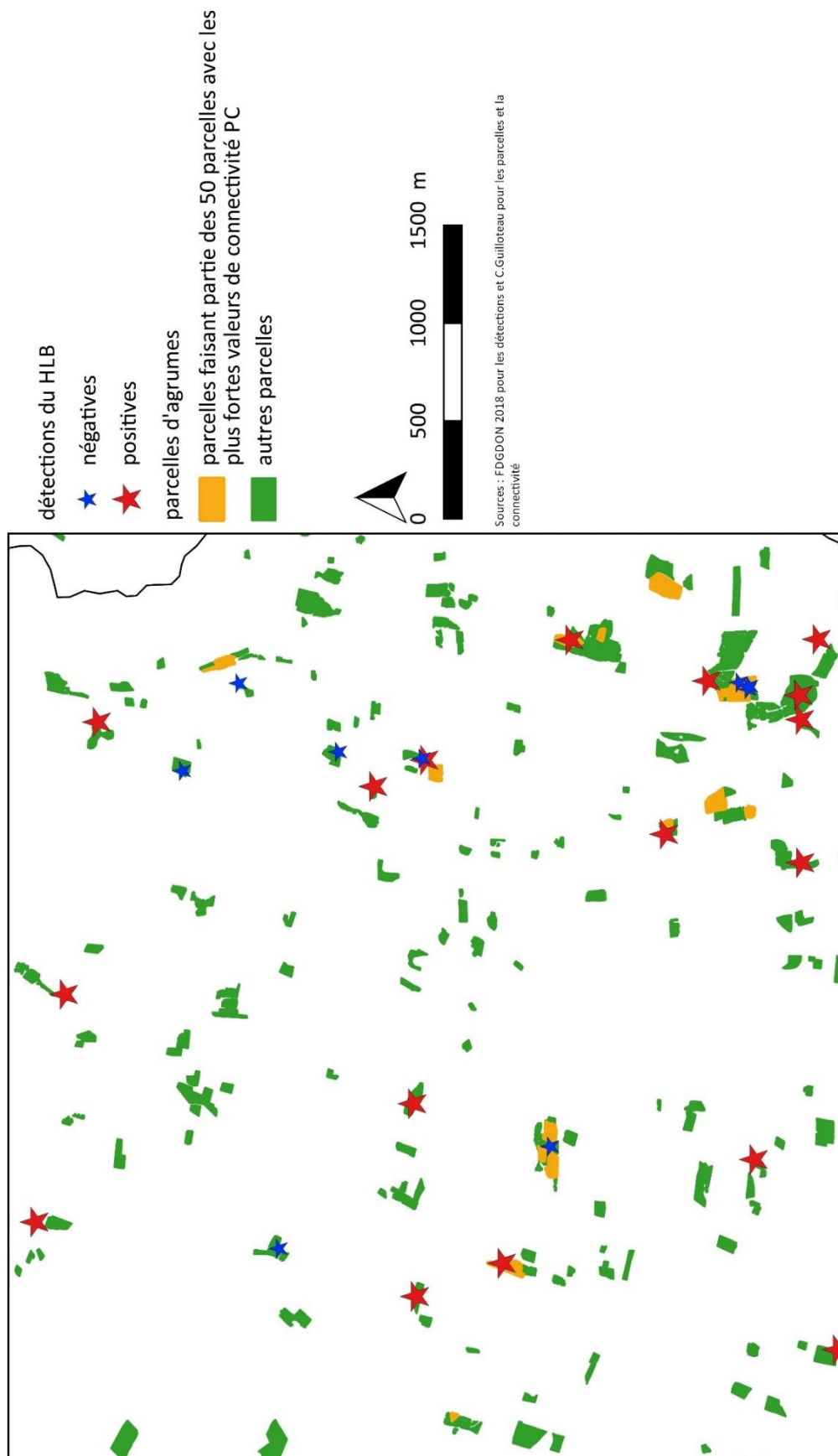
nom du champ	type de champ	valeurs prises	signification
type	texte	agrumes/verger	pour les parcelles présentes dans les bases de données initiales
id	nombre entier		identifiant de la parcelle
type_terr	texte	agrumes/mixte/non agrumes/?	type observé sur le terrain
espece_ter	texte		espèce observée sur le terrain si déterminée
date_terr	date		date de relevée sur le terrain
qui_terrai	texte	CC/CV/fdgdon	CC : terrain effectuée par Corentin Exbrayat et Camille Guilloteau; CV : terrain effectuée par Virginie Ravigné et Camille Guilloteau...
comm_terr	texte		commentaires à l'issue du terrain
surface_ha	nombre décimal		surface en hectares
Dbut_Vrif	date		date de la première image sur laquelle on observe des alignements d'arbres
Fin_Vrif	date		date de la première image où l'on ne voit plus d'arbres alignés ou de la dernière image disponible
actuelles_contour_1	bouleen		1 si les arbres de la parcelles sont visibles sur la dernière image disponible, 0 sinon
divise	texte		source du contour
Date_relev	bouleen		1 si la parcelle est issue de la division d'une parcelle d'une base de données initiale, 0 sinon
plantation	date		date du relevé d'après les bases de données initiales
P_av_deb	date		date de plantation d'après les bases de données initiales
P_ap_fin	date		1 si la date de plantation est antérieure à la date de début, 0 sinon
P_ap_rel	date		1 si la date de plantation est postérieure à la date de fin, 0 sinon
deb_ap_fin	date		1 si la date de plantation est postérieure à la date de relevé, 0 sinon
R_ap_fin	date		1 si la date de début est postérieure à la date de fin, 0 sinon
R_av_deb	date		1 si la date de relevé est postérieure à la date de fin, 0 sinon
err_date	date		1 si la date de relevé est antérieure à la date de début, 0 sinon
pbl_date	date		1 si il y a des 6 champs précédents à une valeur de 1, 0 sinon
comm_date	date		nom de l'incohérence de date si une à été relevée
Base_Fruit	date		commentaire relatif à l'erreur de date
bos_14	date		1 si la parcelle est répertoriée dans la base de données "Base Fruit", sinon
rajout_bos	date		1 si la parcelle est répertoriée dans la base de données "bos_14", sinon
Extract_rp	date		1 si la parcelle est répertoriée dans la base de données "rajout_bos", sinon
verif-pruv	date		1 si la parcelle est répertoriée dans la base de données "Extract_rp", sinon
s_dat_deb	date		1 si la parcelle est répertoriée dans la base de données "verif-pruv", sinon
s_dat_fin	date		source de la date de début
source_P	date		source de la date de fin
source_R	date		source de la date de plantation
COMMUNE	date		source de la date de relevé
etat_2018	date		commune où est localisée la parcelle
superpose	date		1 si un alignement d'arbres est visible, 2 si des arbres non alignés sont visibles, 3 sinon (pour les parcelles de type 'agrumes')
commentair	date		1 si des parcelles correspondant à des périodes différentes - se superposent, 0 sinon
autre_inf	date		commentaire relatif à des observations faites lors de la fusion des bases de données
accessibil	date		informations données par le voisinage ou les techniciens
class_alti	date		1 si accessibles depuis la route, 0 sinon

Les champs en orange foncé sont renseignés pour toutes les parcelles, ceux en orange clair ont été renseignés après le terrain pour les parcelles prospectées. Les champs en gris sont des champs qui ont été utilisés lors d'une étape de la mise en place de la base de données mais qui n'ont pas été menés à bout : ils ne sont pas renseignés pour toutes les parcelles.

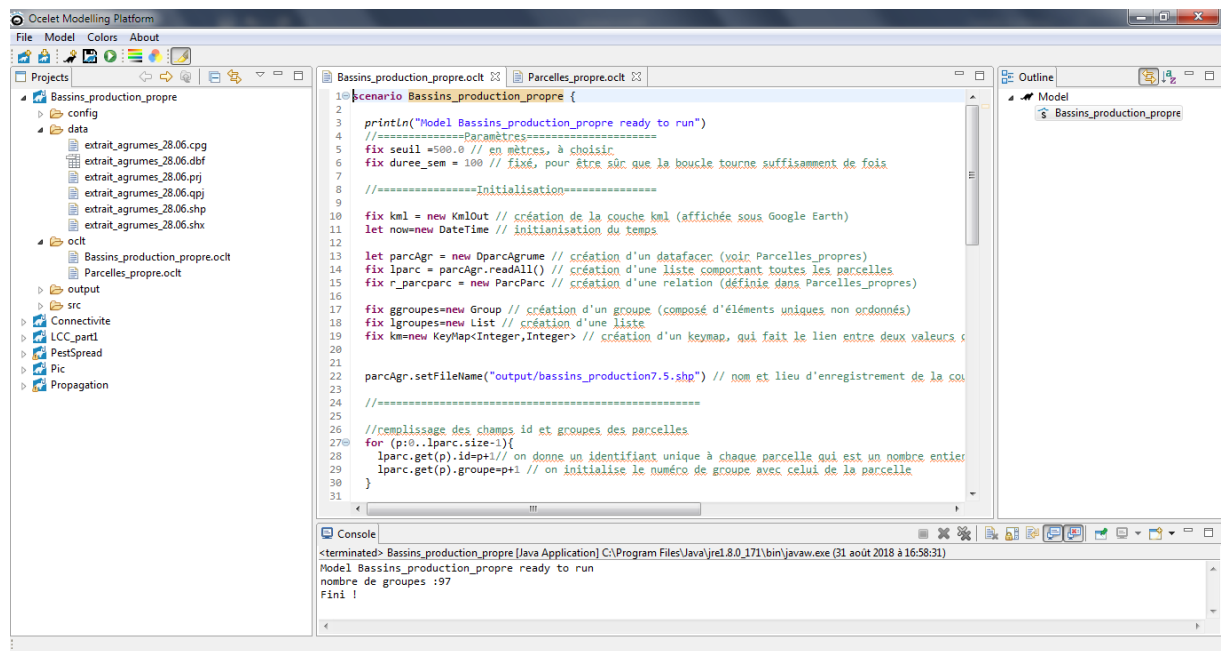
- **Annexe 4 : superficies de vergers d'agrumes par commune d'après la base de données initiale**



- Annexe 5 : détections du HLB et connectivité des parcelles à Petite-Ile



- **Annexe 6 : environnement de travail Ocelet**



- **Annexe 7 : Exemples de captures d'écran des résultats de simulations Ocelet, ouverts sous Google Earth**

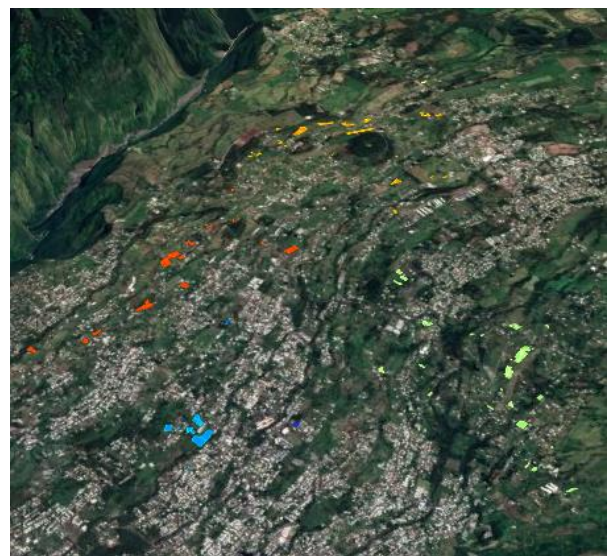
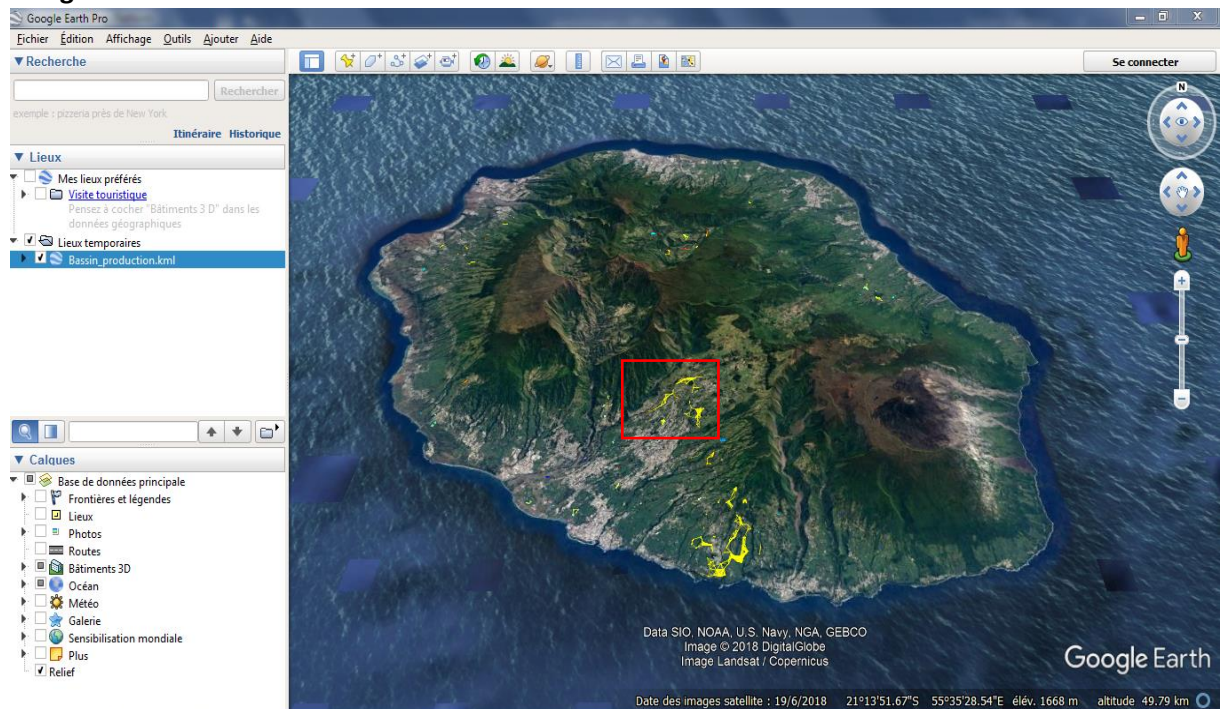


Figure a.6 : Groupes de parcelles distantes de moins de 500 mètres (voir script 1). Vue générale avec les liens (en haut), zoom sur la zone correspondant au rectangle rouge, avec et sans les liens (en bas).

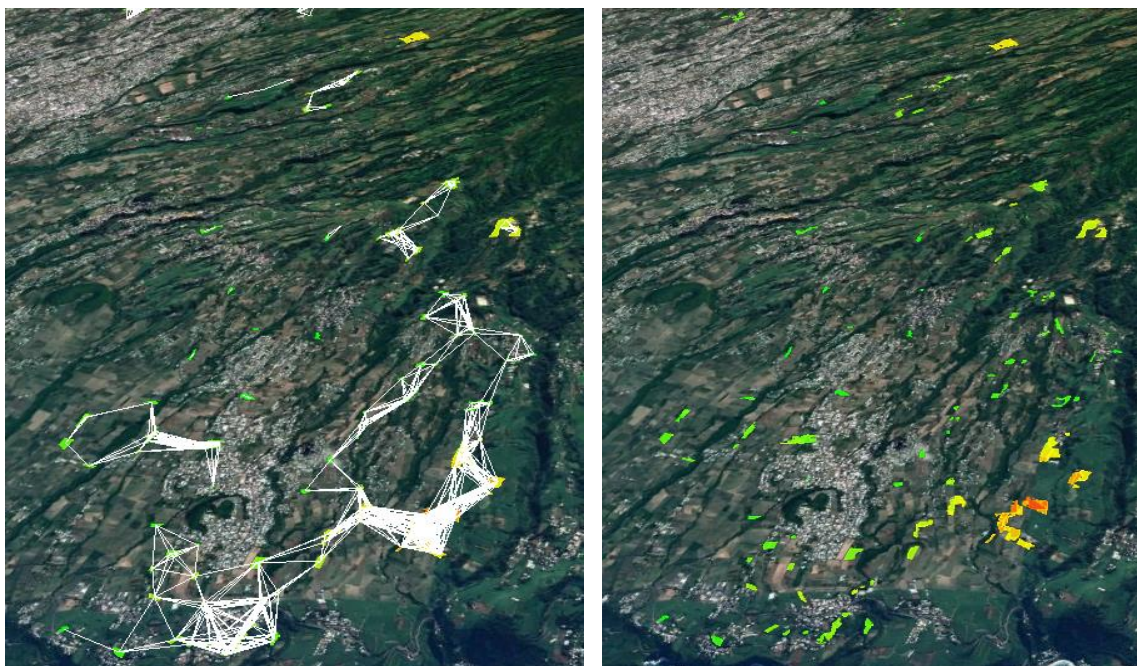


Figure a.7 : Surfaces d'agrumes dans un rayon de 500 m autour de chaque parcelle (voir script 2), à Petite Ile, avec et sans les liens.
La couleur des parcelles dépend des surfaces qui lui sont connectées avec un dégradé du vert (faible surface) au orange foncé (forte surface).

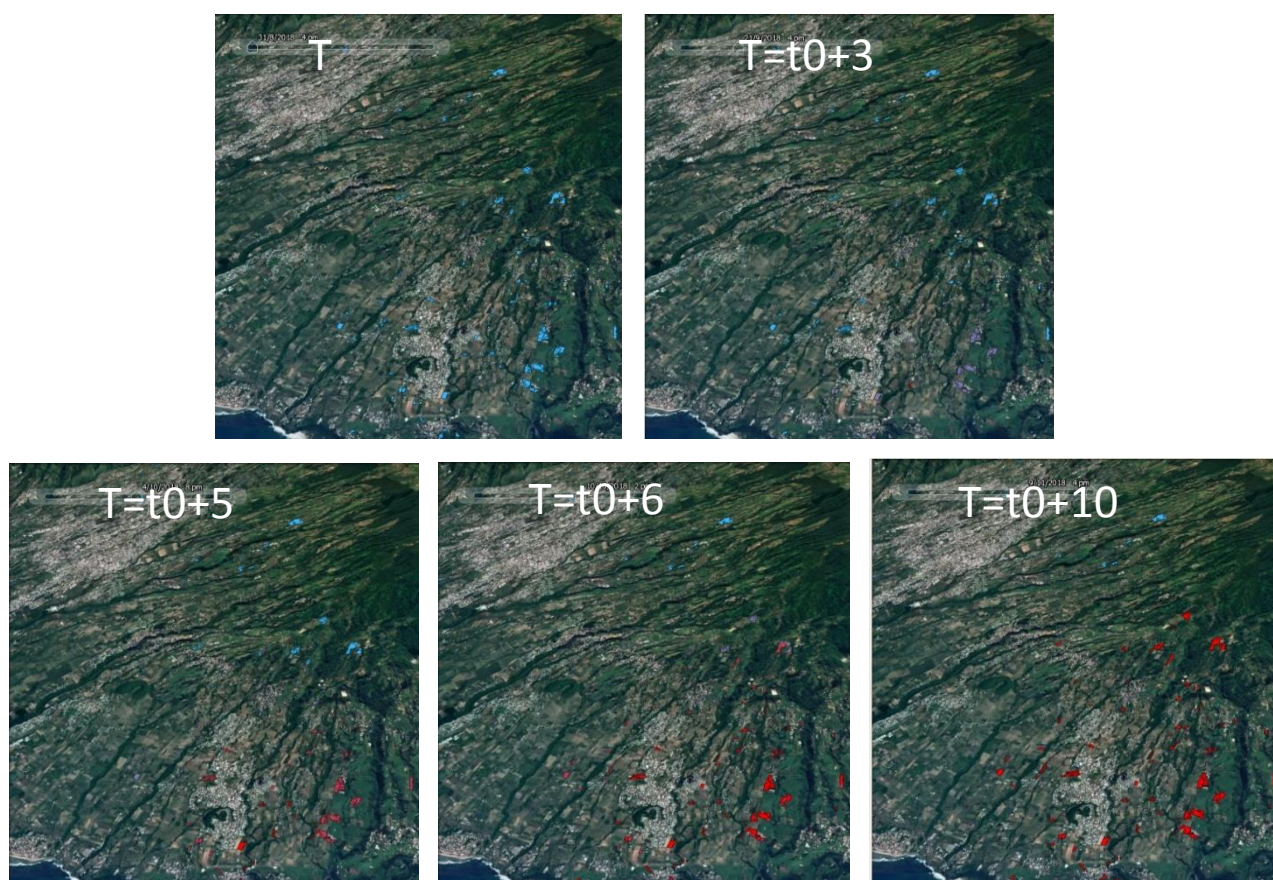


Figure a.8 : Simulation de propagation d'une épidémie entre les parcelles d'agrumes de Petite-Ile (script 3).
Les parcelles bleues sont saines, les violettes en phase de latence, les rouges claires symptomatiques et les rouge vif arrachées.

- **Annexe 8 : scripts Ocelet**

Remarques à propos des scripts : Chaque script est séparé en deux parties. La première contient l'initialisation et le code à proprement parler et la seconde la création des entités, des relations et des datafacers, qui permettent de faire le lien entre les fichiers de données déjà existants et le code Ocelet.

Le script 2 'connectivité' est beaucoup moins annoté que le script 1 'bassins_productions-propre' car il lui est très semblable à quelques différences près, qui sont mentionnées.

- Script 1

```
scenario Bassins_production_propre {

    println("Model Bassins_production_propre ready to run")
    //=====Paramètres=====
    fix seuil =500.0 // en mètres, à choisir
    fix duree_sem = 100 // fixé, pour être sûr que la boucle tourne suffisamment de fois

    //=====Initialisation=====

    fix kml = new KmlOut // création de la couche kml (affichée sous Google Earth)
    let now=new DateTime // initianisation du temps

    let parcaAgr = new DparcaAgrume // création d'un datafacer (voir Parcelles_propres)
    fix lparc = parcaAgr.readAll() // création d'une liste comportant toutes les parcelles
    fix r_parcparc = new Parcparc // création d'une relation (définie dans Parcelles_propres)

    fix ggroupe=new Group // création d'un groupe (composé d'éléments uniques non ordonnés)
    fix lgroupe=new List // création d'une liste
    fix km=new KeyMap<Integer,Integer> // création d'un keymap, qui fait le lien entre deux valeurs
    de type entier

    parcaAgr.setFileName("output/bassins_production7.5.shp") // nom et lieu d'enregistrement de la
    couche shapefile qui sera créée à la fin du programme

    //=====

    //remplissage des champs id et groupes des parcelles
    for (p:0..lparc.size-1){
        lparc.get(p).id=p+1// on donne un identifiant unique à chaque parcelle qui est un nombre
        entier [ça ne fonctionnait pas en faisant directement 'for p: 1..lparc.size']
        lparc.get(p).groupe=p+1 // on initialise le numéro de groupe avec celui de la parcelle
    }

    //relation parcelle-parcelle et dessin du graphe
    r_parcparc.addAllParcelle(lparc)// on ajoute les parcelles de lparc à la relation...
    r_parcparc.addAllParcelle(lparc)//...2 fois car la relation est entre les parcelles et les
    parcelles
    r_parcparc.complete.voisin(seuil).connect// on connecte les parcelles qui sont éloignées de
    moins de la distance seuil définie (voir Parcelles_propres)
    r_parcparc dessineLiens(kml) // on dessine les liens sur la couche kml (voir Parcelles_propres)

    //"propagation" entre les parcelles reliées de la même valeur de groupe (id le plus grand des
    parcelles connectées)
    for(sem:1..duree_sem){// avec le fonctionnement de la relation, il faut plusieurs boucles pour
    englober toutes les parcelles
        r_parcparc.groupe
        now=now.addWeeks(1)//ici on a mis un temps mais un compteur simple aurait aussi fonctionné
    }

    //valeurs uniques des noms de groupes provisoires récupérées dans un Groupe et transfert dans
    une liste
    for (p:0..lparc.size-1){
        ggroupe.add(lparc.get(p).groupe)
    }

    for (i:0..lparc.size-1){
        if (ggroupe.contains(lparc.get(i).id)){
            lgroupe.add(lparc.get(i).groupe)
        }
    }
    println("nombre de groupes :"+lgroupe.size)

    //Key Map pour avoir des noms de groupes de 1 à n (n=nombre de groupes)
    for (g:0..lgroupe.size-1){
```



```

        let groupe=lgroupe.get(g)
        km.put(groupe,g+1)
    }

    //remplacement des noms de groupes provisoire par un nombre de 1 à n
    for (p:0..lparc.size-1){
        lparc.get(p).groupe=km.get(lparc.get(p).groupe)
    }

    //=====tracé et sauvegarde en kml et .shp=====
    //kml
    kml.defStyle("lien",1.0,Color|rgba(255,255,0,100),Color|rgb(255,255,0))// définition de la
couleur des liens
    fix bgyrcolors=colorRange(lgroupe.size,"bgyr")
    kml.defStyleRange("bgyr",1d,bgyrcolors,0.5)
    for (parc:lparc) parc.dessineParcelles(kml,"bgyr")// dessin des parcelles sur la couche kml en
piochant les couleurs dans le dégradé 'bgyr' déjà existant
    kml.saveAsKml()

    //shp
    parcAgr.remove
    for (parc:lparc) {
        parcAgr.append(parc)
    }
    println("Fini !")
}

//Script 1- Partie 2

//=====Entité Parcelle et service dessine parcelle=====
entity Parcelle{ // définition de l'entité parcelle et de ces propriétés. Chaque propriété est
caractérisée par son nom et un type de données
    property MultiPolygon geom
    property Integer id
    property Long idcouche
    property Integer groupe
    property String espece_ter
    property String date_terr
    property Double surface_ha
    property String commune
    property String source
    property String vrif_GEart

    service dessineParcelles(KmlOut kml, String style){// service pour dessiner les parcelles dans
la couche kml
        fix color= groupe// la couleur de la parcelle dépend de son groupe
        kml.addGeometry("Parcelle","groupe-"+groupe,"","",geom,style+color,0.0)//tracage de la
parcelle
    }
}

//=====relation parcelle-parcelle et interactions=====
relation ParcParc<Parcelle p1, Parcelle p2> {

    interaction dessineLiens(KmlOut kml) {
        fix line = Line|points(p1.geom.centroid,p2.geom.centroid)//tracé du lien entre les
parcelles p1 et p2
        kml.addGeometry("Liens",p1.id+"-"+p2.id,"","",line,"lien",0.0)
    }

    interaction groupes (){
        p1.groupe=p2.groupe// 2 parcelles connectées prennent le même numéro de groupe
        p2.groupe=p1.groupe
    }agg{
        p1.groupe+<<idGroupe//on prend le plus grand numéro de groupe avec la fonction d'aggrégation
idGroupe (voir ci-dessous)
        p2.groupe+<<idGroupe
    }
    filter voisin(Double seuil) {// cette interaction n'est effectuée que sur les parcelles éloignée
d'une distance inférieure à la distance seuil
        return (p1.geom.envelope.distance(p2.geom.envelope) < seuil) &&//on teste d'abord la distance
entre les enveloppes pour gagner en rapidité

```

```

    (p1.geom.distance(p2.geom) < seuil)// puis on teste la distance entre les centroïdes
  }

}
//=====aggrégation : on prend la valeur de l'id la plus élevée=====
aggreg Integer idGroupe{
  let m=1
  for(v:values) m=max(m,v)
  return m
}

//=====datafacers=====
datafacer DparcAgrume {// permet de faire le lien entre les parcelles de la couche de départ (base
de données) et les entités parcelles créées dans le programme
  data Shapefile("data/extrait_agrumes_28.06.shp","EPSG:32740")// chemin vers la base de donnée
et système de coordonnées de référence
  match Parcelle{// on fait correspondre les champs de la base de donnée (en bleu et entre
guillemets) avec les noms des propriétés des parcelles (en noir)
    idcouche : "id"
    geom : "the_geom"
    espece_ter : 'espece_ter'
    date_terr : 'date_terr'
    surface_ha : 'surface_ha'
    commune : "COMMUNE"
    source : 'source'
    vrif_GEart : 'vrif_GEart'
    groupe : 'groupe'

  }
}

```

```

datafacer KmlOut {
  data KmlExport("output/Bassin_production.kml")
}

```

- Script 2

```

scenario Connectivite{
  println("Model ready to run")
  //=====Paramètres=====
  fix seuil =45000.0

  //=====Initialisation=====

  fix kmltampon = new KmlOutT
  let parcaAgr = new DparcAgrume
  fix lparc = parcaAgr.readAll()
  fix r_parccarc = new ParcParc
  let maxtamp=0.0

  parcaAgr.setFileName("output/tampons45000.shp")

  //=====

  //remplissage des champs id et tampon
  for (p:0..lparc.size-1){
    lparc.get(p).id=p+1
    lparc.get(p).tampons=lparc.get(p).surface_ha// on initialise la valeur de la propriété
"tampon" par la surface de la parcelle
  }

  //relation parcelle-parcelle et dessin du graphe
  r_parccarc.addAllParcelle(lparc)
  r_parccarc.addAllParcelle(lparc)
  r_parccarc.complete.voisin(seuil).connect
  r_parccarc.tampon
  r_parccarc.dessineLiens(kmltampon)

  for (p:0..lparc.size-1){
    lparc.get(p).tamponint=1+(lparc.get(p).tampons).intValue
    if((lparc.get(p).tampons)>maxtamp){

```

```

        maxtamp=lparc.get(p).tampons
    }
}
//=====tracé et sauvegarde en kml et .shp=====
//kml

let gyrcolors=colorRange((maxtamp+1).intValue,"gyr")
kmltampon.defStyleRange("gyr",1d,gyrcolors,0.5)

for (parc:lparc) parc.dessineParcellestamp(kmltampon, "gyr")
kmltampon.saveAsKml()

//shp
parcAgr.remove
for (parc:lparc) {
    parcAgr.append(parc)
}
println("Fin! ")
}

//Script2-Partie 2

entity Parcelle{
    property MultiPolygon geom
    property Integer id
    property Long idcouche
    property Double surface_ha
    property Double tampons
    property Integer tamponint// utilisé pour colorer les parcelles selon la surface de "tampons"
(il faut un entier donc on arrondit)

    service dessineParcellestamp(KmlOutT kmltampon, String style){
        fix colortamp= tamponint
        kmltampon.addGeometry("Parcelle", "tampon-"+tampons, "", "", geom, style+colortamp, 0.0)
    }
}

//=====relation parcelle-parcelle et interactions=====
relation ParcParc<Parcelle p1, Parcelle p2> {

    interaction dessineLiens(KmlOutT kmlconnect) {
        fix line = Line|points(p1.geom.centroid,p2.geom.centroid)
        kmlconnect.addGeometry("Liens",p1.id+"-"+p2.id,"", "", line, "lien", 0.0)
    }

    interaction tampon(){
        p1.tampons=p2.tampons
        p2.tampons=p1.tampons
    }agg{
        p1.tampons+<<Sommed// on fait la somme des parcelles connectées (voir fonction d'aggrégation ci-
dessous)
        p2.tampons+<<Sommed
    }

    filter voisin(Double seuil) {
        return (p1.geom.envelope.distance(p2.geom.envelope) < seuil) &&
        (p1.geom.distance(p2.geom) < seuil)
    }
}

//=====aggrégation : on prend la valeur de l'id la plus élevée=====

aggreg Double Sommed{
    let m=0.0
    for(v:values) m=m+v
    return m
}

//=====datafacers=====
datafacer DparcAgrume {
    data Shapefile("data/extrait_agrumes_28.06.shp", "EPSG:32740")
    match Parcelle{
        id: "id"
        geom : "the_geom"
    }
}

```

```

        tampons : 'tampons'
        surface_ha : 'surface_ha'
    }
}

datafacer KmlOutT {
    data KmlExport("output/tampon.kml")
}

```

- Script 3

```

scenario Propagation {
    println("Model propagation ready to run")
    //=====Paramètres=====
    fix duree_sem=10 // choix de la durée de simulation, en semaines
    let lprob_dist=List.of(0.01,0.02,0.03,0.01,0.001,0.01,0.005,0.005,0.003,0.05)// probabilité de
propagation. Peut être remplacé par une fonction pour tirer au hasard une probabilité selon une loi
donnée
    let prob_arrache=random()// la probabilité d'arrachage est définie aléatoirement. On peut remplacer
par une loi de probabilité si on la connaît

    //=====Initialisation=====

    fix kml=new KmlOut
    let now=new DateTime
    let parcAgr = new DparcAgrume
    fix lparc = parcAgr.readAll()
    fix r_parcparc = new ParcParc
    //=====key_map=====
    let km = new KeyMap<Integer, String> // Keymap faisant le lien entre les chiffres et les états des
vergers
    km.put(1,'sain')
    km.put(2,'latence')
    km.put(3,'symptomatique')// on peut adapter pour prendre en compte d'autres compartiments
    km.put(4,'arrache')

    //remplissage des champs id et groupes des parcelles
    for (p:0..lparc.size-1){
        lparc.get(p).id=p
        lparc.get(p).etat=1// tous les arbres sont sains au début
        lparc.get(p).seuil=0
        lparc.get(p).arrache=0
    }

    //choix de la parcelle de départ (aléatoire)
    let contam_ini_pos=(random*lparc.size).intValue
    lparc.get(contam_ini_pos).etat=2 // les arbres de la parcelle contaminée sont malades mais pas
encore symptomatiques
    for (parc:lparc){
        parc.dessineParcelles(kml)//on trace toutes les parcelles
    }

    //=====Graphe=====
    //relation parcelle-parcelle et dessin du graphe
    r_parcparc.addAllParcelle(lparc)// on prend en compte les parcelles de lparc pour la relation
r_parcparc
    r_parcparc.addAllParcelle(lparc)
    r_parcparc.complete.connect

    for(sem:1..duree_sem){
        let prob=lprob_dist.get((random()*lprob_dist.size).intValue)// choix d'une probabilité
au hasard dans la liste
        for (p:lparc){
            p.dessineContam(kml, now)
            if (p.etat==2){
                p.seuil=p.seuil+1
            }
            if (p.seuil>2){
                p.etat=3
            }
            p.arrachage(prob_arrache)
        }
    }
}

```

```

        if(p.arrache==1){
            p.etat=4
        }
    }
    r_parccparc.distan(prob).contamination
    now=now.addWeeks(1)
    //println(prob)
}
r_parccparc.distan(0.01).dessineLiens(kml, now)

//=====tracé et sauvegarde en kml=====

kml.saveAsKml()
println("Fini !")
}

//Script 3- Partie 2

//=====Entité Parcelle et service dessine parcelle=====
entity Parcelle{
    property MultiPolygon geom
    property Integer id
    property Integer etat
    property Integer seuil
    property Integer arrache

    service dessineParcelles(KmlOut kml){
        kml.addGeometry("Parcelle","Id-"+id,"",geom,"parc"+etat,0.0)// la couleur des
        parcelles dépend de leur état
        let colrange=colorRange(4,Color|rgb(57,185,253),Color|rgb(255,0,0))
        kml.defStyleRange("parc",1d,colrange,-0.5)
    }

    service dessineContam(KmlOut kml, DateTime debut){
        if(etat>1){//on ne prend en compte que les parcelles déjà infectées pour gagner en temps
        (ne pas retracer toutes les parcelles à chaque fois, seulement celles qui changent d'état ou qui sont
        susceptibles de l'être)
            kml.addGeometry("Parcelle","Etat-
            "+etat,debut,debut.addWeeks(1),geom,"parc"+etat,0.0)// les parcelles ne sont tracées que sur un
            intervalle d'une semaine
            let colrange=colorRange(4,Color|rgb(57,185,253),Color|rgb(255,0,0))
            kml.defStyleRange("parc",1d,colrange,-0.5)
        }}

    service arrachage(Double proba){
        if (etat==3){// quand les arbres sont symptomatiques, ils sont arrachés avec une
        probabilité choisie
            if(random()>proba){//ici loi uniforme pour l'exemple.
                arrache=1
            }
        }
    }
}

//=====relation parcelle-parcelle et interactions=====
relation ParcParc<Parcelle p1, Parcelle p2> {

    interaction dessineLiens(KmlOut kml, DateTime debut) {
        fix line = Line|points(p1.geom.centroid,p2.geom.centroid)
        kml.addGeometry("Liens",p1.id+"-"+p2.id,debut,debut.addWeeks(1),line,"lien",0.0)
    }

    interaction contamination (){
        p1.etat=p2.etat
        p2.etat=p1.etat
    }agg{
        p1.etat+<<Maximum//si on met +<<Max on prend en compte la valeur de p1 dans le calcul
        p2.etat+<<Maximum // la parcelle dont l'état est le plus avancé "influence" les autres
        parcelles (la maladie ne se guérit pas toute seule)
    }
}

```

```

    filter distan(Double proba) { // on prend en compte la distance avec un filtre, on suppose que
plus les parcelles sont proches plus elles pourront être contaminées rapidement
    return ((p1.geom.envelope.distance(p2.geom.envelope)/70000)< proba) && // on divise par
70000m/70km pour avoir une distance entre 0 et 1 et pour pouvoir comparer avec la probabilité donnée en
argument
    ((p1.geom.distance(p2.geom)/70000)< proba)&&(p1.arrache==0)&&(p2.arrache==0) // l'état ne peut
plus être modifié ou influencé une fois qu'une parcelle est arrachée
    }
}

aggreg Integer Maximum{ // existe déjà dans Ocelet normalement mais je n'ai pas réussi à la faire
fonctionner
    let i=(0).intValue
    for (v:values){
        let a=(v).intValue
        if (a>i){
            i=a
        }
    }
    return i
}

//=====datafacers=====
datafacer DparcAgrume {
    data Shapefile("data/agrumes_01.06-nettoyee.shp", "EPSG:32740")
    match Parcelle{
        geom : "the_geom"
        id : "id"
    }
}

datafacer KmlOut {
    data KmlExport("output/propagation.kml")
}

```