Télédétection et modélisation de populations de moustiques vecteurs

Extraction d'indicateurs paysagers à partir d'images d'Observation de la Terre pour l'estimation de la distribution des gîtes larvaires en milieu urbain

Année 2020/2021

Auteur : Ophélie HOARAU, Master 2 RNET parcours GT

CIRAD (Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement) et CYROI (Cyclotron Réunion Océan Indien)

Tuteurs de stage :

Annelise TRAN (Chercheuse en modélisation spatiale / épidémiologie, CIRAD, UMR Territoires, Environnement, Télédétection et Information Spatiale (TETIS), UMR Animal, Santé, Territoires, Risques, Ecosystèmes (ASTRE))

Thibault CATRY (Chercheur en télédétection / épidémiologie, IRD, UMR EspaceDev)

Tuteur pédagogique : Gwenaëlle PENNOBER

Résumé

Aedes albopictus représentent un danger sanitaire à l'échelle mondiale. Les résultats de cette étude se focalisent sur la Réunion, qui connaît actuellement une crise épidémique de dengue. Afin d'apporter une méthode supplémentaire et opérationnelle pour l'estimation des zones à risques de transmission de maladies par moustiques vecteurs, une approche texturale exploitant une image à très haute résolution spatiale est appliquée, de sorte à produire un ensemble d'indices de textures pour la prédiction du nombre de gîtes en milieu urbain par l'outil FOTOTEX.

Mots clés : *Aedes albopictus*, vecteur, transmission de maladies, image à très haute résolution spatiale, indice texturale, prédiction, milieu urbain

Abstract

Aedes albopictus is a worldwide health hazard. The results of this study focus on Réunion, which is currently experiencing a dengue epidemic crisis. In order to provide an additional and operational method for estimating areas at risk of disease transmission by vector mosquitoes, a textural approach using a very high spatial resolution image is applied, so as to produce a set of texture indices for the prediction of the number of roosts in urban areas using the FOTOTEX tool.

Keywords : *Aedes albopictus*, vector, disease transmission, very high spatial resolution image, texture indice, prediction, urban

Sommaire

1. Introduction 5
1.1. Contexte du stage 6
1.2. Objectifs 6
1.3. Etat de l'art 7
1.3.1. Télédétection appliquée à la prévention et la surveillance des zones à risque de transmission de maladies par moustiques 7
1.3.2. Approche texturale en télédétection 9
1.4. Zones d'étude 10
1.4.1. La Réunion et son climat 10
1.4.2. Zones d'action de Lutte Intégrée sur Zones et d'Education Sanitaire (ALIZES) 11
1.4.3. *Aedes albopictus* à La Réunion 11
2. Matériels et méthodes 11
2.1. Données 11
2.1.1. Données sur les gîtes larvaires 11
2.1.2. Surface bâtie de La Réunion 15
2.1.3. Données de télédétection 15
2.1.4. Autres données 16
2.2. Méthodologie 17
2.2.1. Indices radiométriques 17
2.2.2. Pourcentage bâtiment et végétation 18
2.2.3. Discrimination du milieu urbain sur l'image Pléiades 19
2.2.3. Application de l'analyse de texture sur FOTOTEX 19
2.2.4. Analyse statistique 23
2.2.5. Prédiction du nombre de gîtes 24
3. Résultats 25
3.1. Textures en milieu urbain sous FOTOTEX 25
3.2. Approche statistique 26
3.2.1. Analyse univariée 26
3.2.2. Analyse multivariée des modèles statistiques d'estimation du nombre de gîtes 27
4. Discussion 30
4.1. Résultats biologiques 30
4.2. Une méthode originale et opérationnelle 31
Conclusion 31
Remerciements 32
Bibliographie 33

Sommaire de figures

Figure 1 : Cartographie de la distribution globale d'Aedes albopictus 5
Figure 2 : Comparaison d'images THRS et HRS 8
Figure 3 : Schéma synthétique des différentes notions de textures (Lefebvre, 2011)..... 9
Figure 4 : Cartographie des zones ALIZES 12
Figure 5 : Méthode du porte à porte par l'ARS pour supprimer les gîtes présents dans les jardins 13
Figure 6 : Types de gîtes et leur répartition 14
Figure 7 : Répartition des gîtes potentiels par maisons visitées pour 100 maisons 14
Figure 8 : Cartographie de la surface bâtie de La Réunion dans les zones ALIZES 15
Figure 9 : Schéma synthétique de la méthodologie pour le pourcentage de bâtis et végétation 18
Figure 10 : Synthèse de la méthode de discrimination de la mosaïque Pléiades 19
Figure 11 : Étapes des processus de caractérisation de l'information texturale sous l'algorithme FOTO (Teillet et al, 2021) 20
Figure 12 : Schéma synthétique de la méthode des moyennes des rasters dans les zones ALIZES 22
Figure 13 : Schéma de la méthode statistique en analyse univariée 23
Figure 14 : Schéma de la méthodologie de l'analyse multivariée..... 24
Figure 15 : Exemples de sorties FOTOTEX 25
Figure 16 : Graphique des prédictions du nombre de gîtes par maisons visitées pour 100 maisons..... 29
Figure 17 : Prédiction du nombre de gîtes estimées pour 100 maisons dans chaque zone ALIZES 30

Sommaire de tableaux

Tableau 1 : Corrélations et p-value de chaque variables explicatives selon le nombre de gîtes potentiels par maisons visitées pour 100 maisons..... 26
Tableau 2 : Variables significatives du meilleur modèle avec les valeurs de corrélations estimées et leur p-value 28

1. Introduction

La problématique de l'expansion rapide d'insectes peut causer des problèmes sanitaires et économiques dans les régions touchées. Les moustiques, n'en faisant pas exception, sont vecteurs d'agents pathogènes transmis aux humains ou aux animaux par piqûres, on parle alors de maladie vectorielle. Par définition, ce sont des maladies infectieuses transmises par arthropodes hématophages, essentiellement des insectes. Elles sont responsables de plus de 17 % des maladies infectieuses et de plus d'un million de décès chaque année dans le monde (OMS, 2017). Cette émergence d'arboviroses a engendré au cours des dernières décennies plusieurs épidémies, notamment l'épidémie du Chikungunya (2005 - 2006) et de dengue (1977 - 1978) qu'a connu la Réunion ou encore le Zika que connaissent plusieurs régions du monde (Caraïbes, Asie du Sud-est, etc), chacune causées par les moustiques *Aedes* (TRAN, et al., 2020 ; Centre européen de prévention et de contrôle des maladies, 2018). Parmi ces espèces, *Aedes albopictus*, une espèce homologue à *Aedes aegypti*, qui est un des vecteurs de la dengue dans le monde, avec une moindre compétence vectorielle[1] est majoritaire à la Réunion.

Aedes albopictus ("moustique tigre") est une espèce invasive originaire des forêts d'Asie du Sud-Est qui s'est dispersée à travers le monde par le biais de commerce internationaux, notamment des pneus (Paupy et al. 2009) qui constituent un site d'oviposition attractif pour les femelles de cette espèce (Hawley, 1988). Il a su s'adapter aux conditions environnementales des régions tempérées et tropicales durant ces dernières années, et particulièrement dans les milieux urbains. Il est considéré comme l'une des espèces les plus envahissantes au monde (Lowe et al. 2000). Kraemer et al. (2015) fournissent une distribution géographique à l'échelle mondiale d'*Ae. albopictus* (figure 1), montrant sa présence en Europe, en Amérique du Nord et Sud, en Afrique et Océanie. *Ae. albopictus* fait également parler de lui à La Réunion, étant donné qu'il est responsable de la récente reprise épidémique de la dengue, causant jusqu'à ce jour plus de 16 200 cas confirmés en 2021 (point épidémique de la dengue du 25 mai 2021).

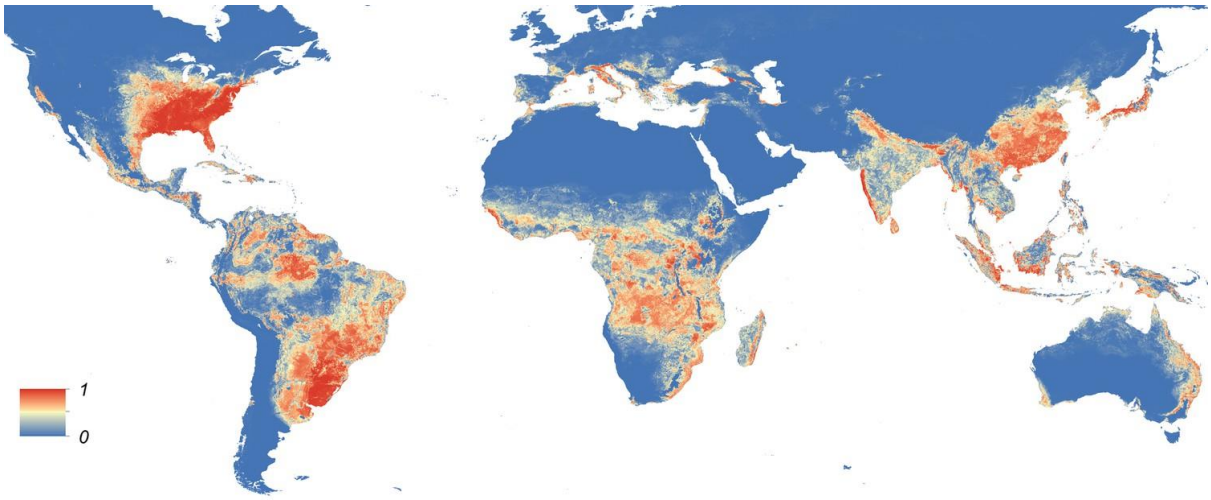


Figure 1 : Cartographie de la distribution globale d'Aedes albopictus
En rouge : probabilité de présence d'Aedes albopictus est égale à 1
En bleu : région où la probabilité de présence vaut 0
(Kraemer et al.2015)

[1] Capacité à transmettre un agent pathogène.

Aucun traitement n'existe contre la maladie, et bien qu'un vaccin soit actuellement homologué, l'OMS préconise son utilisation uniquement lorsque les pays présentent une situation épidémique incontrôlable avec un haut taux de morbidité. Ainsi, plusieurs moyens de prévention et de limitation de transmission sont appliqués. Parmi ces méthodes de contrôle, on compte la pulvérisation d'insecticides autour des cas de dengue dans le cadre d'une lutte anti-vectorielle (LAV[2]) effectuée par l'ARS (Agence Régionale de Santé) (Haramboure, 2020), qui est essentielle pour contrôler les épidémies, et le porte à porte visant à éliminer les potentiels lieux de reproduction de moustiques (gîtes larvaires) pour la prévention. Les outils de modélisation sont également très adéquats pour favoriser l'identification des zones d'interventions, la surveillance et le contrôle des régions à risques.

1.1. Contexte du stage

Ce stage s'inscrit dans le projet ANISETTE (ANalyse Inter-Site : Evaluation de la Télédétection comme ouTil prédictif pour la surveillance et le contrôle de maladies causées par moustiquEs). Il a pour objectif de mesurer les différentes méthodes couplant télédétection et modélisation spatiale pour la prédiction de la dynamique de moustiques vecteurs et des maladies associées. Il est réalisé en collaboration avec l'Institut de Recherche pour le Développement (UMR Espace Dev) et le Cirad (UMR TETIS, UMR ASTRE).

Parmi les méthodes testées dans le cadre du projet ANISETTE, l'outil ARBOCARTO est un outil de cartographie prédictive de la dynamique de population des moustiques *Aedes*, et il est utilisé en routine (de manière hebdomadaire) par l'ARS à la Réunion (Tran et al., 2020). A la Réunion, les données qui alimentent ARBOCARTO sont les pluies et températures quotidiennes fournies par Météo-France, et des données sur la répartition des gîtes larvaires[3] potentiels estimées à partir d'observations de terrain réalisées entre 2007 et 2011 (Tran et al., 2020).

Afin de mettre à jour cette cartographie des gîtes larvaires potentiels à la Réunion, en collaboration avec l'ARS, on appliquera durant cette étude des méthodes exploitant des données du service de LAV sur les gîtes larvaires recueillies durant une récente campagne de collecte de données qui a débuté en 2020 (toujours en cours). Le stage permettra de les aider à optimiser autant le temps d'acquisition, qu'au niveau opérationnel lorsqu'il faut prospecter dans des zones plus difficiles d'accès.

1.2. Objectifs

L'objectif principal de ce stage consiste à développer une méthode d'estimation des zones favorables au moustique tigre vecteur de maladies. On souhaite mettre à profit les informations issues de la mosaïque Pléiades avec résolution fine en milieu urbain à La Réunion, pour produire un indicateur favorable à la reconnaissance des zones comportant des gîtes, selon un échantillon représentatif de la réalité provenant de l'ARS.

Ce stage a donc deux objectifs spécifiques : i) extraire, à partir d'imagerie à très haute résolution spatiale (THRS), des indices paysagers pertinents pour la description des zones habitées, où le moustique tigre est présent à la Réunion et représente un danger pour la santé humaine et ii) identifier s'il existe des corrélations éventuelles entre ces indices combinés à des variables climatiques et les données sur les gîtes, pour ainsi créer un modèle de prédiction

[2] La lutte contre les arthropodes hématophages lorsque ces derniers sont vecteurs potentiels d'agents pathogènes pour l'homme ou les animaux, ou lorsqu'ils deviennent nuisibles pour la santé publique.
[3] Lieu de ponte pour la femelle.

pouvant être utile à l'avenir pour l'ARS dans ces opérations. Le but étant d'obtenir une cartographie à l'échelle de La Réunion des zones représentant un plus haut risque de transmission.

Nous verrons dans un premier temps la synthèse bibliographique des études existantes dans le domaine de la télédétection dans la gestion du risque de transmission de maladies par moustiques vecteurs. Dans un second temps, nous expliciterons les données et les méthodes appliquées pour la construction du modèle prédictif à l'échelle de La Réunion. Troisièmement, nous présenterons les résultats obtenus de cette nouvelle approche par l'analyse de texture couplée à la télédétection et la modélisation. Enfin, nous discuterons de l'évolution des résultats cartographiques dans le papier de Tran et al (2020), ainsi que des perspectives éventuelles de la méthode.

1.3. Etat de l'art

1.3.1. Télédétection appliquée à la prévention et la surveillance des zones à risque de transmission de maladies par moustiques

La télédétection est une technique par laquelle l'acquisition d'images satellites permet d'observer des informations de la surface de la Terre. Son processus consiste à l'enregistrement de l'énergie du rayonnement électromagnétique émis ou réfléchi, de traitement, de l'analyse des informations et la mise en application de ces informations (Billey, 2018). Ce rayonnement est composé d'ondes caractérisées par plusieurs grandeurs physiques telles la longueur d'onde, la fréquence et la période. Le soleil est un parfait exemple de source d'énergie, étant donné qu'il émet un rayonnement électromagnétique qui sera absorbé et renvoyé en partie par une cible. Cette énergie réfléchie ou émise par les objets sera captée et enregistrée sous forme d'image par un capteur embarqué dans le satellite. Ces images sont caractérisées par leurs résolutions spatiales (la taille d'une surface observée au sol représentée par un pixel), spectrales (aptitude du capteur à distinguer les différentes longueurs d'ondes d'un rayonnement électromagnétique) et temporelle (Billey, 2018).

La télédétection fournit une multitude de produits, dont des images satellites à très haute résolution spatiale (THRS), donnant accès à des images avec un niveau de détail permettant une cartographie fine d'une zone spécifique, comme par exemple Pléiades, qui est un satellite lancé en 2011 fournissant des images multispectrales (en couleur) de 2m de résolution et une image panchromatique (en noir et blanc) à 50 cm. Dans notre étude, on part de l'hypothèse que ce type d'image peut nous apporter plus d'informations sur les gîtes en raison de leur résolution plus fine qu'une image à haute résolution spatiale (HRS) par exemple. En effet, les images HRS telles que Sentinel-2 ont une résolution spatiale de 10 m donnant moins de détails visibles, contre une THRS de type Pléiades beaucoup plus fine (Fig 2).

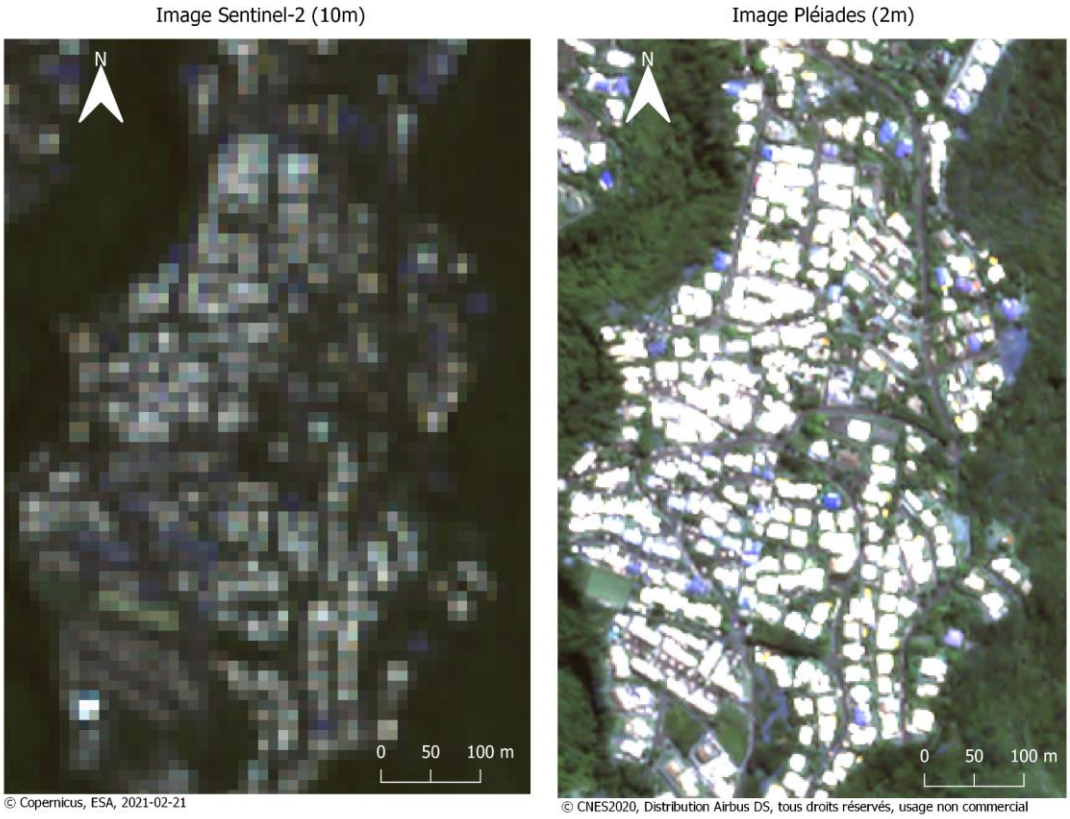


Figure 2 : Comparaison d'images THRS et HRS

Il faut savoir qu'il n'est pas possible d'identifier de manière directe la position des gîtes larvaires de l'espèce *Aedes albopictus* sur une image satellite, en raison de leur petite taille. De ce fait, on tend à utiliser des indicateurs paysagers (indices de végétation, etc) et météorologiques (précipitations, température, etc). Au cours de ces dernières années, les progrès de l'épidémiologie spatiale ont été fortement motivés par l'utilisation de système d'information géographique (SIG) et des systèmes de données géoréférencées. Dans le cas des maladies à transmission vectorielle, la télédétection présente un fort potentiel dans la cartographie des risques de maladie et de contextualisation de l'environnement. Marti et al (2020) ont proposé un inventaire permettant d'identifier les facteurs paysagers les plus pertinents, pouvant être impliqués dans la transmission de la dengue en milieu urbain. Grâce à des images de télédétection et de couches SIG, les recherches sur lesquelles reposent leur étude, leur ont permis de caractériser les facteurs paysagers pertinents. Puis, par la construction puis l'application d'un modèle statistique, une quantification des relations entre les facteurs du paysage urbain (zones d'eau, détection de bâtiment par indice de luminosité, couverture végétale par NDVI, etc) et les cas de dengue ont pu être identifiés. Leur étude a ainsi démontré que la transmission de la dengue à l'humain a été principalement guidée par la présence de zones végétalisées, les surfaces en eau et la présence d'activité humaine. Le but serait de produire un nouvel indicateur paysager pouvant apporter plus de détails dans la représentation de zones d'activité humaine, zones dans lesquelles la transmission de dengue est forte. Néanmoins, ces zones urbanisées sont des milieux très hétérogènes en termes de typologie (peu ou beaucoup de bâtiments, avec végétation ou peu de végétation) et d'organisation spatiale. Ainsi, pour les caractériser, on souhaite se baser sur des indices de

textures, puisqu'ils sont directement visibles sur une image, où on assimile l'urbain à des motifs. Par ailleurs, la texture est souvent appliquée pour caractériser les milieux urbains (Ratti et Richens, 1999 ; Ratti et al, 2005 ; Dell'Acqua et al, 2005) et végétalisés (Wood et al, 2012 ; Murray et al, 2010 ; Chowdhury et al, 2015), mais pas dans la mise en relation avec la transmission de maladies par moustique. Un algorithme de texture non-supervisé par le biais d'image satellite a été développé dans le cadre du projet ANISETTE, à partir duquel nous appliquons la texture à la mosaïque Pléiades pour extraire les caractéristiques des zones urbaines liées à la texture, et de tester les corrélations avec les gîtes larvaires.

1.3.2. Approche texturale en télédétection

L'analyse de texture a été développée dans les années 1970 comme méthode mathématique pour la classification, segmentation ou synthèse des images (Haralick, 1973). Il s'agit d'une notion importante dans le traitement d'image, souvent utilisée comme information complémentaire aux informations spectrales dans la description d'une image (Couteron et al, 2006). Lorsqu'on parle de texture, il s'agit de la fréquence et l'orientation d'un motif dans un premier temps, et de son organisation spatiale de l'autre (Haralick, 1979). La texture d'image quant à elle, c'est l'agencement spatial de la couleur ou des intensités dans une image. (Quevedo et al, 2008 ; Mendoza et al, 2008).

La notion d'analyse de texture d'une image permet de comprendre la façon dont les pixels sont ordonnés et le regroupement spatial de ces pixels (Brynolfsson et al, 2017). Lefebvre (2011) a émis plusieurs notions rapportées à l'analyse de texture (fig 3) dans lesquelles on compte la notion d'isotropie, pour laquelle la répartition des motifs s'effectue dans toutes les directions (à contrario, elle est anisotrope) ; la notion de micro et macro-texture visant une représentation fine ou grossière de l'image ; la notion d'échelle d'observation, pour laquelle la taille de fenêtre d'analyse doit être suffisamment grande pour inclure le motif définit et suffisamment petite pour conserver la dépendance spatiale et identifier la texture correspondante à l'objet ; et la résolution spatiale de l'image satellite utilisée en entrée des méthodes d'extraction de texture (Teillet, 2019).

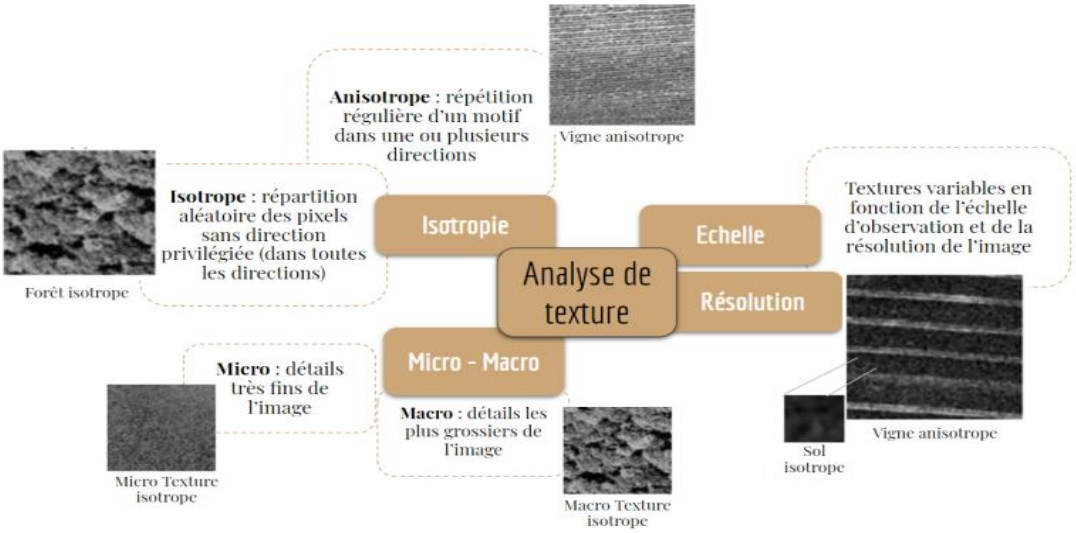


Figure 3 : Schéma synthétique des différentes notions de textures (Lefebvre, 2011)
(Teillet, 2019)

Conners et Zucker (1983) ont déjà proposé des méthodes reconnaissant la périodicité d'une texture en utilisant la matrice de cooccurrence de niveau de gris, permettant ainsi la reconnaissance de la structure spatiale de la texture. Les éléments à extraire de cette texture seront quant à eux reconnus en utilisant la transformée de Fourier (Matsuyama et al, 1983). Ainsi, pour procéder à cette analyse de texture, les transformées de Fourier s'avèrent très utiles. Elles permettent d'avoir des informations fréquentielles et bidirectionnelles sur les fluctuations des données à l'intérieur de la fenêtre d'analyse (Jeansoulin, 2000). On peut donc passer du domaine spatial au domaine fréquentiel, par le biais d'une décomposition fréquentielle des signaux qui constitue la texture. Plusieurs méthodes sont appliquées en supplément des transformées de Fourier, telle qu'une analyse en composante principale (ACP). Il s'agit là d'une méthode d'analyse de données visant à identifier les groupes d'objets ou d'individus et les liens qu'ils ont entre eux (Couteron et al, 2006).

L'analyse de texture présente un fort potentiel dans la distinction des différents objets composants l'urbain par le biais d'une image satellite (Teillet et al, 2021). En effet, l'apport de l'information texturale et la prise en compte de l'information des pixels voisins, associées aux informations spectrales permet de réduire la confusion entre certains motifs de l'image. Ceci peut être lié à la résolution spatiale et la fenêtre d'analyse, d'où l'importance de l'adapter par rapport à ce que l'on souhaite caractériser (Teillet, 2019). Ainsi dans le cadre de ce stage, on souhaite extraire des informations texturales de l'urbain à partir d'une mosaïque Pléiades dans des zones spécifiques déterminées par l'ARS, de sorte à créer un nouvel indicateur apte à décrire les zones à risques de transmission de maladies vecteurs en milieu urbain.

1.4. Zones d'étude

1.4.1. La Réunion et son climat

L'île de La Réunion est un département français situé dans l'hémisphère Sud dans l'Océan Indien et se localise par 55°29 de longitude Est et 21°53 de latitude Sud. D'une superficie de 2512 km², elle s'élève à une altitude de 3071 m au niveau du Piton des Neiges qui est le plus haut sommet de l'Océan indien. Étant en milieu insulaire et présentant une hétérogénéité des reliefs, cela engendre des contrastes climatiques marqués qui diffèrent entre l'Est et l'Ouest.

Elle présente un climat tropical humide avec un ensoleillement sur les côtes toute l'année. La zone se divise en deux saisons : la saison sèche (en hiver) et la saison des pluies (en été). En période estivale (novembre à avril), le climat est caractérisé par des pluies abondantes avec des risques de cyclones et des températures supérieures à 30°C. Par ailleurs, la région Est étant le plus soumise aux alizés, présente des pluies fréquemment enregistrées durant les deux saisons, contrairement à la région Ouest. En période d'hiver austral (saison sèche de mai à octobre), les températures varient entre 22 et 24°C au niveau du littoral. Selon l'altitude, la température peut chuter jusqu'à 0°C, et des gelées sont d'ailleurs relativement fréquentes vers 1800m.

1.4.2. Zones d'action de Lutte Intégrée sur Zones et d'Education Sanitaire (ALIZES)

Pour cibler au mieux ces zones à risques de transmission de maladies par moustique, des parcelles nommées zones ALIZÉS (Action de Lutte Intégrée sur Zones et d'Éducation Sanitaire) sont délimitées dans le cadre de la LAV. Elles regroupent 1203 zones de surveillance sur lesquelles l'ARS applique un protocole d'intervention, tel que le porte à porte des maisons visant à sensibiliser la population à adopter des gestes simples pour lutter contre la prolifération de gîtes dans leur jardin, ou encore la pulvérisation lorsqu'un cas de dengue se déclare dans un quartier.

Ces zones ALIZES constituent nos zones d'étude.

1.4.3. *Aedes albopictus* à La Réunion

Aedes albopictus est la principale espèce vectrice de maladies depuis 1953 à La Réunion et peut s'étendre dans les zones urbaines, périurbaines et rurales. L'espèce s'étant adaptée à ces zones, toutes surfaces pouvant contenir des eaux stagnantes représentent des lieux de ponte potentiels qu'elles soient naturelles ou anthropiques (trous de roches, souche de bambou, petits récipients, pots de fleurs, gouttières, etc) (Boyer et al, 2014 ; Bagny, 2009). Les conditions environnementales et météorologiques influencent la reproduction et le développement d'*Ae. albopictus.* Le nombre de gîtes, la dimension et la présence d'espaces verts affectent également leur abondance en milieu urbain.

2. Matériels et méthodes

2.1. Données

2.1.1. Données sur les gîtes larvaires

Dans le cadre de la lutte anti-vectorielle (LAV), l'ARS applique plusieurs méthodes dont le porte à porte auquel j'ai participé afin de comprendre la collecte des données terrains. Les données de terrain sur le nombre de gîtes larvaires qui alimentent l'outil ARBOCARTO étant relativement anciennes, une nouvelle campagne est mise en œuvre depuis août 2020 dans le but de réactualiser les données de gîtes. La campagne étant toujours en cours, nous comptons 122 zones ALIZES sur 1203 représentant des données cumulées de août 2020 jusqu'à février 2021 pour l'application de nos calculs (fig 4).

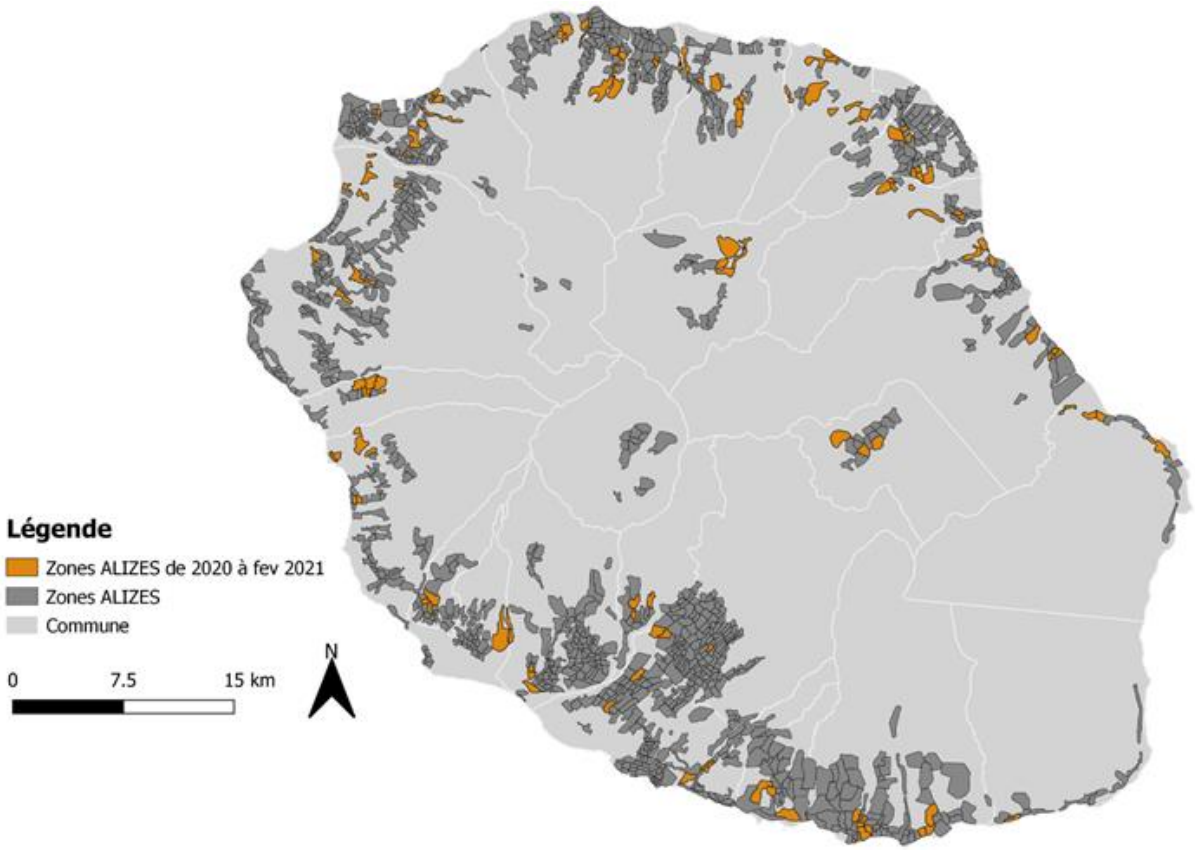


Figure 4 : Cartographie des zones ALIZES
En gris foncé : zones ALIZES délimitées par l'ARS ; orange : zones ALIZES utilisées pour nos calculs de la campagne de 2020 à février 2021

Durant cette campagne, l'ARS collecte ces données de gîtes larvaires par la méthode du porte à porte, en procédant à une prospection des jardins en repérant les gîtes potentiels propices à la reproduction de larves de moustiques (fig 5). Ces gîtes sont sélectionnés selon leur durabilité dans le temps. En effet, une zone exposée au soleil subira une évaporation et ne permettra pas aux larves de se développer. A contrario, si l'eau peut stagner durant une période d'environ 1 semaine, on le compte comme lieu de ponte possible. Les données concernant le nombre de gîtes proviennent donc directement des données terrains recueillies par l'ARS lors du porte-à-porte effectué. Elles constituent un ensemble de données exploitées durant cette étude sur les 122 zones ALIZES, dont le nombre de gîtes potentiels (Gp), les types de gîtes et le nombre de maisons visitées (Me).

Figure 5 : Méthode du porte à porte par l'ARS pour supprimer les gîtes présents dans les jardins

Les gîtes potentiels (Gp) regroupent tous les lieux pouvant faire office de lieu de ponte (soit l'ensemble des types de gîtes), pouvant être mis en eau par les précipitations ou par l'homme (exemple : arrosage), qu'il soit sec ou rempli d'eau. Parmi ces gîtes on compte différents types (fig 6), où les soucoupes et les petits récipients sont dominants. Les autres types représentent un faible pourcentage, et le type Autre (A) peut caractériser des trous d'égout, tuyaux, etc. Les gîtes types Petits Récipients (PR) représentent quant à eux, uniquement les récipients < 10L, à contrario les Grands Récipients (GR) les récipients > 10L.

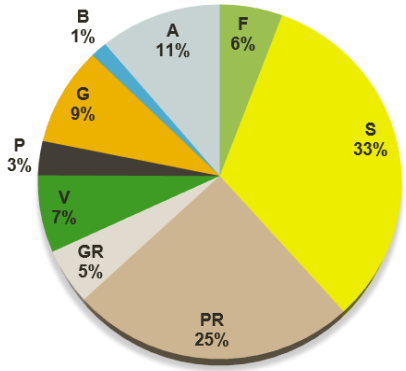


Figure 6 : Types de gîtes et leur répartition
F : pot de fleur ; S : soucoupe ; PR : petit récipient ; GR : grand récipient ; V : gîtes naturels ; P : pneu ; G : gouttière ; B : bassin et piscine ; A : autre

A noter que durant le porte à porte, les personnes sont en droit de refuser la visite de l'ARS sur leur terrain, ne permettant donc pas le prélèvement de données. De ce fait, il est préférable de travailler uniquement avec des données provenant des maisons visitées. Ici, on compte des données collectées pour 10870 maisons visitées 12482 non visitées (543 refus et 11939 absents), soit 47% de maisons visitées contre 54% de maisons non visitées (3% refus et 51% absents).

Pour cette étude, on travaillera sur le nombre de gîtes potentiels pour 100 maisons (fig 7).

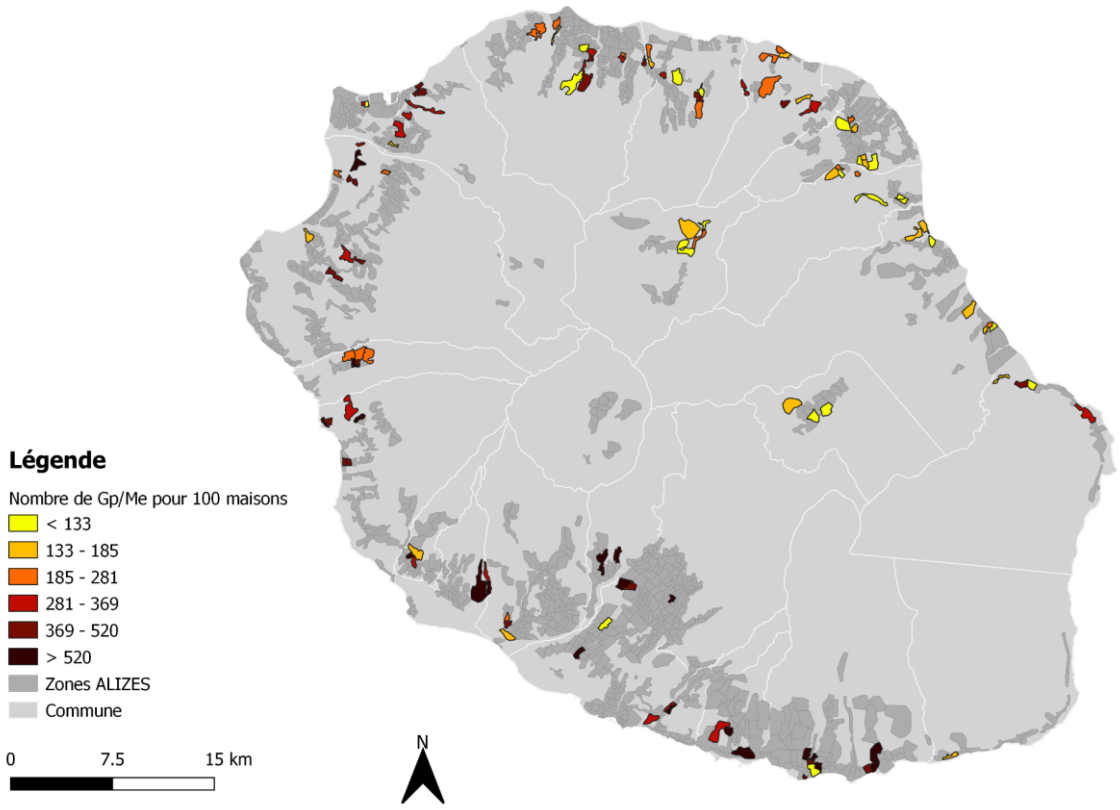


Figure 7 : Répartition des gîtes potentiels par maisons visitées pour 100 maisons

2.1.2. Surface bâtie de La Réunion

La surface bâtie provient de la couche d'occupation du sol du CIRAD datant de 2019. Elle a été réalisée grâce à une classification supervisée combinant la mosaïque d'image Spot 6/7 acquises en 2019 par la chaîne Moringa, mise au point par l'UMR TETIS. On a extrait la surface bâtie contenue dans la couche, pour ensuite l'adapter de sorte à ne représenter que les bâtiments dans les zones ALIZES (fig 8).

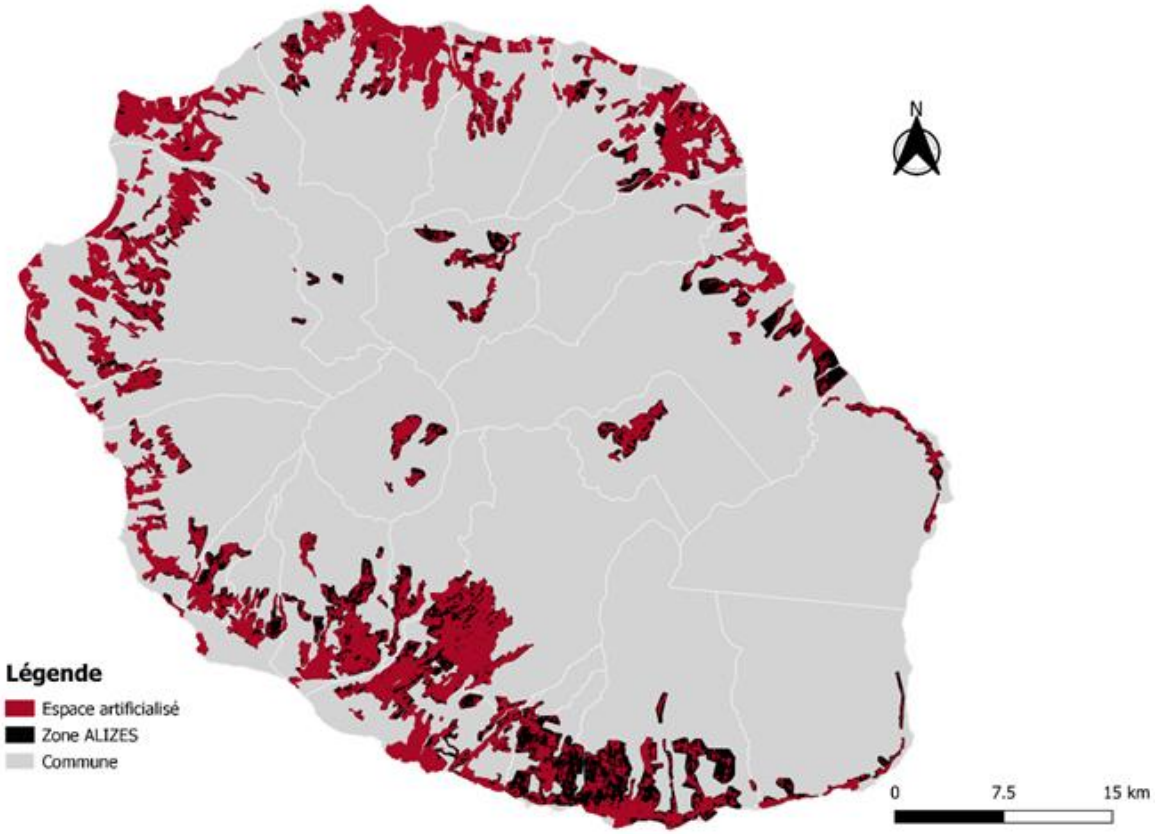


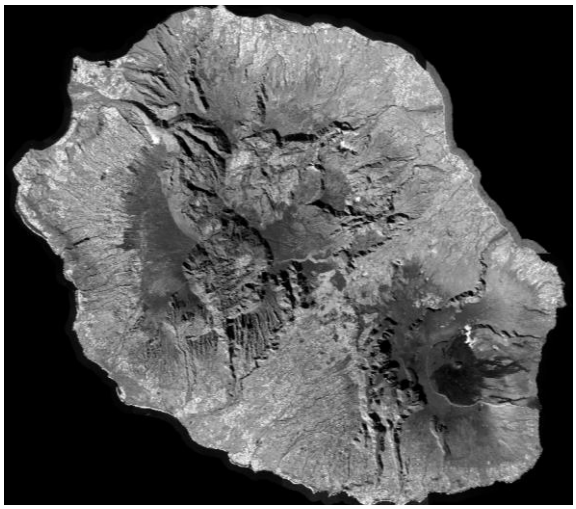
Figure 8 : Cartographie de la surface bâtie de La Réunion dans les zones ALIZES

2.1.3. Données de télédétection

Image satellite de type Pléiades

Les images à très haute résolution spatiale (THRS) de type Pléiades (du programme Kalideos) sont obtenues grâce à un couple de satellites optiques "Pléiades" qui participent au suivi de l'urbanisation, la surveillance des catastrophes naturelles et au développement des voies routières et ferrées. Leur acquisition s'effectue sur de très courts délais selon des programmes spécifiques, avec un ré-échantillonnage au sol à 50cm de résolution en mode panchromatique (PAN) (noir et blanc), et à 2m de résolution en mode multispectral (MS) (couleur).

Les produits utilisés sont des mosaïques PAN à 0,5m de résolution et une mosaïque MS d'une résolution de 2m, datant de 2020 de l'ensemble de La Réunion.



Multispectrale

Taille de l'image en pixels : 139203*124985

Panchromatique

Taille de l'image en pixels : 34798*31244

2.1.4. Autres données

Précipitations

L'impact de la pluie sur la disponibilité des gîtes larvaires a déjà été démontré (Alto et Juliano, 2001 ; Cunze et al, 2016 ; Roiz et Arnoldi, 2010). Les pluies régulières remplissent les gîtes larvaires mais des pluies intenses et persistantes peuvent également faire déborder les gîtes, entraînant la suppression des stades aquatiques (œufs, larves nymphes). D'autre part, le régime des précipitations peut également avoir un impact sur les pratiques humaines (stockage d'eau, arrosage). Ainsi, nous utilisons les données de cumul annuel de pluies provenant de Météo France, interpolées sur toute La Réunion pour l'année 2020.

Température

Plusieurs études ont démontré que les changements de températures affectent les taux de reproduction et de mortalité d'*Ae. albopictus* (Cunze et al, 2016 ; Kache et al, 2020 ; Lounibos et al, 2002 ; Delatte et al, 2009). Une augmentation de température jusqu'à un certain point est susceptible de favoriser le taux de croissance et de développement d'*Aedes albopictus*. Néanmoins, des températures trop élevées peuvent provoquer une perte des œufs ou des adultes (Alto, 2001 ; Hien, 1975). Elle peut impacter l'activité de vol des moustiques, le comportement de recherche d'hôte, leur développement larvaire, la fécondité des femelles et la longévité des adultes, ainsi que son potentiel effet sur les pathogènes eux-mêmes et comment le climat peut affecter la transmission de certains de ces pathogènes (Reinhold, 2018

; Parker, 1986 ; Hurlbut, 1973 ; Rueda et al, 1990). La présence d'*Aedes albopictus* se fait préférentiellement dans les zones ayant une température minimale de 4°C et un maximum de 30°C (Bagny, 2009 ; Alto et al, 2001). Une étude d'Alto et Juliano (2001) a montré que l'accroissement de population du moustique est proportionnel aux températures de 22 à 26°C. Étant donné qu'à La Réunion, la variation de température se fait dans ces ordres de grandeur, la présence de moustiques tigre se fait plus souvent en été, mais également en période d'hiver austral.

Les données de températures utilisées proviennent de la base de données de Météo-France et correspondent à la température annuelle de 2020. Pour obtenir une représentation spatiale des données, on procède par interpolation de sorte à avoir un visuel de la variation de température à l'échelle de toute La Réunion.

Altitude

Des études ont montré que la distribution de l'espèce peut être influencée par l'altitude. A la Réunion, dans les années 50, *Ae. albopictus* est décrit comme l'espèce d'*Aedes* dominante dans les habitats situés en dessous de 1200 m (Hamon, 1953). Cette donnée provient de la BD TOPO de 2013 et réalisée par l'IGN, avec une résolution de 25m.

2.2. Méthodologie

Toutes les données ont été exportées et traitées sous QGIS 3.10.10 (A Coruna), ArcGis 10.6, OTB 7.2.0 (Orfeo ToolBox) et R 4.0.5.

2.2.1. Indices radiométriques

Les produits d'Observation de la Terre permettent d'extraire plusieurs informations. Par le biais de notre mosaïque Pléiades, on y appliquera le calcul de trois indices radiométriques :

- Indice de végétation par différence normalisée

$$NDVI = (PIR - R) / (PIR + \mathrm{R})$$

PIR : réflectance dans le proche infrarouge ; R : réflectance dans le rouge

L'application d'un NDVI permet de repérer la végétation préférentiellement. La normalisation par la somme des deux bandes permet de réduire l'effet d'éclairement. Les valeurs de NDVI sont comprises entre -1 et +1, les valeurs négatives correspondantes aux surfaces autres que la végétation, pour lesquelles la réflectance dans la bande R est supérieure à la bande PIR (exemple : neige, eau). Pour les valeurs proches de 0 la réflectance possède le même ordre de grandeur dans la bande R et PIR tel que les sols nus. Les valeurs positives souvent comprises entre 0,1 et 0,7 caractérisent la couverture végétale plus dense (Rouse et Haas, 1973 ; Tucker, 1979). Elle permettra de représenter les zones végétalisées pouvant abriter les gîtes larvaires.

- Indice d'eau par différence normalisée (Normalized Difference Water Index)

$$NDWI = (G - PIR)/(G + PIR)$$

G : vert

Cet indice varie en fonction de la teneur en eau. Il nous sera utile pour déterminer les zones végétalisées humides où l'eau repose, faisant office de gîtes potentiels.

- Indice de brillance

$$IB = \sqrt{R * R + PIR * PIR}$$

Il permet de dissocier les surfaces minérales des couvertures végétales et donc spécifiques aux surfaces artificialisées (zones de bâti, routes, sols nus, etc). Il caractérise l'albédo, en d'autres termes, les surfaces réfléchissantes (bâtiments, sol, nuages, etc) paraîtront plus claires contrairement aux surfaces moins réfléchissantes qui paraîtront plus foncées. Cet indice nous permettra donc de faire ressortir les bâtiments.

2.2.2. Pourcentage bâtiment et végétation

Étant donné que l'on souhaite principalement analyser le nombre de gîtes en milieu urbain, on cherche à comparer si les zones comportant le plus de bâtis et végétation peuvent être liées au nombre de gîtes larvaires. On calcule le pourcentage de bâtiments et de végétation via les rasters NDVI et IB. En procédant sur QGIS 3.10.16 (A Coruna), on estime une valeur seuil s'élevant à 0,4 pour la végétation sur le raster NDVI délimitant végétation et autre, donnant ainsi une binaire (0 = noir et 1 = blanc). Puis pour le raster IB, l'image est découpée à partir de la couche de surface bâtie, de sorte à ne ressortir que les bâtiments et sans végétation. On applique ensuite une statistique de zone pour extraire les statistiques de chacun de ces deux rasters dans chaque zone ALIZES. Le pourcentage de surface bâtie et le pourcentage de surface de végétation de chaque zone ALIZES sont obtenus en divisant respectivement la somme des valeurs des pixels "bâtis" et "végétation" par le nombre de pixels contenus dans la zone.

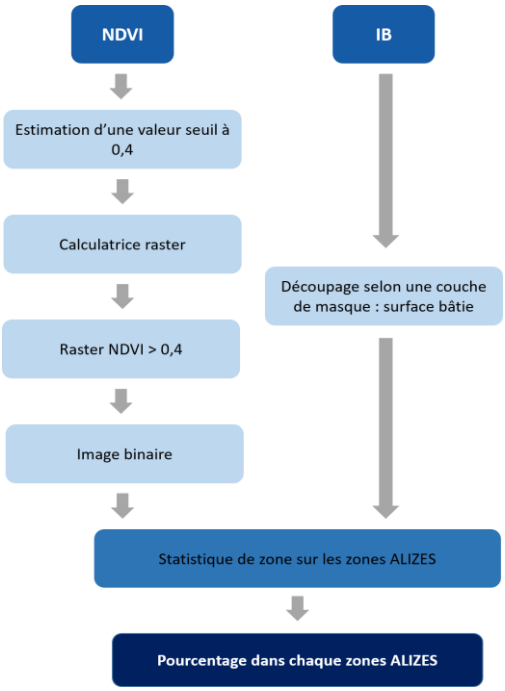


Figure 9 : Schéma synthétique de la méthodologie pour le pourcentage de bâtis et végétation

2.2.3. Discrimination du milieu urbain sur l'image Pléiades

Pour discriminer l'urbain, on superpose la mosaïque Pléiades panchromatique et la couche shapefile des zones ALIZES comme masque sur QGIS, puis on découpe la mosaïque. Ce premier découpage contient de la végétation et des bâtiments présents dans la délimitation. Ensuite, on procède de la même façon, mais en ayant pour masque la couche shapefile de la surface bâtie, où se trouve uniquement les bâtiments et sans végétation.

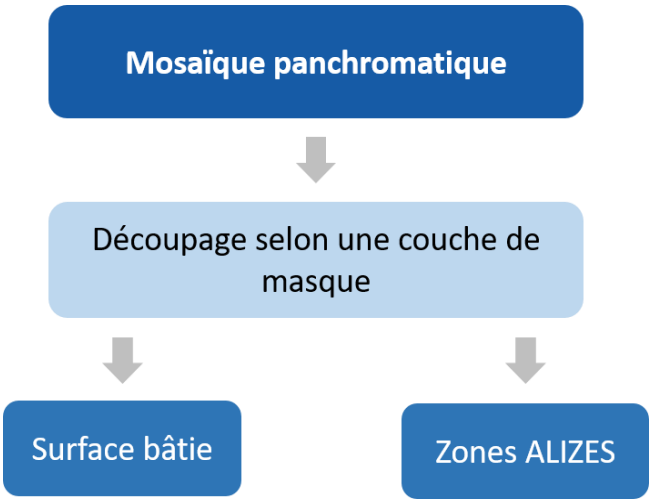


Figure 10 : Synthèse de la méthode de discrimination de la mosaïque Pléiades

2.2.3. Application de l'analyse de texture sur FOTOTEX

L'algorithme FOTOTEX, basé sur FOTO (FOurier-based Textural Ordination) développé sous Matlab, est ensuite développé sous python par Couteron et al (2002), pour caractériser la texture des canopées en forêt tropicale sur des images THRS. Une étude de Teillet et al (2021 et 2019) a montré que l'algorithme peut également être appliqué sur le paysage urbain à différentes échelles (macro, méso et micro-échelle) à partir d'images THRS et HRS. Ainsi, l'un des objectifs du stage est l'utilisation de l'algorithme FOTOTEX pour caractériser les quartiers à l'échelle de La Réunion par imagerie satellite à très haute résolution spatiale de type Pléiades. Cette méthode combine les transformées de Fourier en 2 dimensions à une analyse en composante principale (ACP). La transformée de Fourier sur les images va produire des coefficients du spectre radial (r-spectre), qui seront classés par le biais d'une ACP dont les composantes les plus importantes sont utilisées comme indices de texture. La méthode FOTOTEX offre l'avantage de caractériser les motifs texturaux présents dans l'image grâce à une analyse non supervisée. Le principe de l'algorithme se fait en plusieurs étapes (Fig 11).

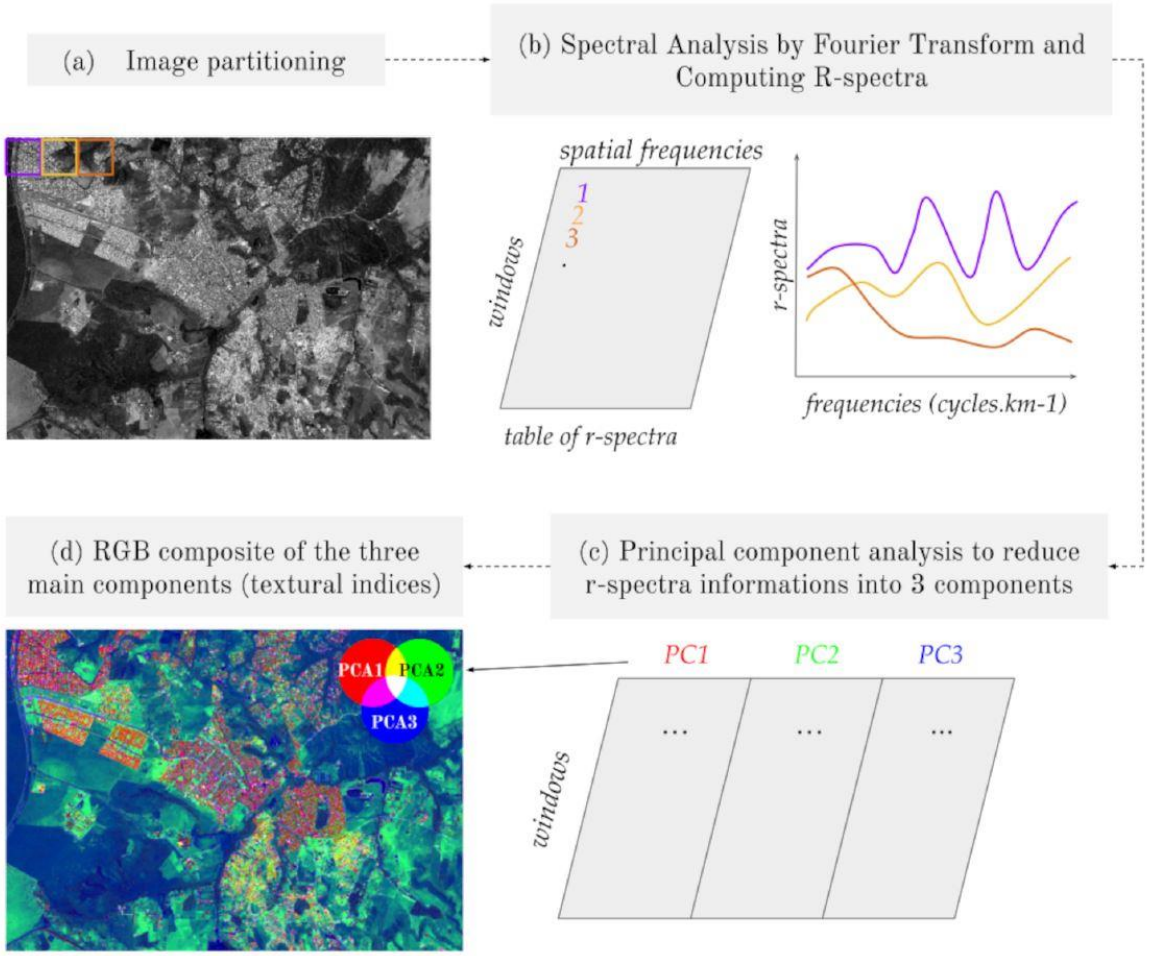


Figure 11 : **Étapes des processus de caractérisation de l'information texturale sous l'algorithme FOTO (Teillet et al, 2021)**

Image partitioning

Cette étape consiste à découper l'image en fenêtre d'analyse en nombre de pixels (Fig 11 (a)). Il constitue un des paramètres d'entrée au choix dans FOTOTEX et doit être adapté à ce qu'on souhaite identifier.
Parmi ces paramètres, deux méthodes de découpage de l'image :
Moving_window (MW) : découpe selon le nombre de pixels choisis, puis se décale en fonction du pas choisi (par défaut 1). Il offre l'avantage de donner des résultats relativement fins, lisses et moins pixelisés, mais le temps de calcul est plus long en raison du décalage si elle s'effectue sur plusieurs fenêtres d'analyse.
Block : découpe selon le nombre de pixels choisis et effectue le processus bloc par bloc.
On a également le choix de la taille de la fenêtre d'analyse. Dans cette étude, après plusieurs tests effectués, on définit les tailles de fenêtre à 67 et 135 pixels, comme les plus adéquates pour caractériser les quartiers en milieu urbain, pour une taille de pixels de 50 cm (image panchromatique). Il faut savoir que notre fenêtre d'analyse, soit la taille de fenêtre, est fonction de la taille du pixel. Ce qui nous donne dans notre cas, une résolution en sortie de 33,5 m et 67,5 m.

Analyse spectrale par transformée de Fourier et r-spectre

Une image est composée de plusieurs motifs différents liés à la variation spatiale du signal en 2 dimensions. Lorsque ce signal est non périodique, on exprime une variance comme étant une somme pondérée de formes d'onde sinusoïdale dans différentes directions et à différentes fréquences spatiales. Cela est réalisé par la transformée de Fourier qui décompose ce signal sous forme de fonctions sinusoïdales (Lang, 2019), dont chacune est caractérisée par une fréquence spatiale. Ces fréquences représentent donc le nombre de fois que le motif se répète dans l'image. Les basses fréquences représentent peu de répétitivité avec une texture grossière, alors que les hautes fréquences présentent une répétitivité plus importante avec une texture plus fine. En partant de ce principe, la variation du signal et son analyse fréquentielle vont donner lieu à des différences de textures dans l'image, permettant ainsi de déterminer les quartiers ayant des structures similaires. En d'autres termes, la transformée de Fourier convertit le signal spatial, soit les motifs de l'image, en un signal fréquentiel, soit le nombre de fois qu'un motif est répété. Un r-spectre peut ensuite être calculé. Il correspond aux valeurs d'énergie de chaque fréquence. Il est calculé grâce aux coefficients de Fouriers relatifs à la décomposition de l'image, qui sont eux-mêmes obtenus par une transformée de Fourier, permettant ainsi d'obtenir une table de spectre d'amplitude (soit une table de r-spectre). Chaque rangée représente une fenêtre donnée, et chaque colonne représente une fréquence spatiale (Fig 11 (b)).

Analyse en composante principale (ACP) et indice textural

Chaque fenêtre est décrite par un nombre de variables fréquentielles, Cependant, le nombre de fréquences qui caractérise une fenêtre est important, en raison de la complexité des motifs (équivaut à la somme de plusieurs fonctions sinusoïdales). Pour réduire le nombre d'informations une ACP est appliquée sachant que ces variables sont centrées et réduites. La réduction permet d'éviter une trop grande influence des basses fréquences, leur variance étant plus importante que les hautes fréquences car le motif sera plus grossier (Couteron et al, 2006 ; Lang, 2019).

Puis, trois axes (PC1 = canal rouge, PC2 = canal vert, PC3 = canal bleu) sont issus de cette ACP. Ils sont représentés sous forme d'image composite rouge-vert-bleu caractérisant la représentation texturale, où les couleurs correspondent à la projection des r-spectres des différentes fenêtres sur ces trois axes (Teillet et al, 2021 ; Lang et al, 2018 ; Proisy et al, 2007).

Application de l'algorithme FOTOTEX

Pour répondre au mieux à notre but qui est d'avoir une représentation des quartiers par des indices de textures, des paramètres doivent être précisés en entrée de l'algorithme. Avec notre image Pléiades découpée selon la surface bâtie dans les zones ALIZES et une autre découpée selon les zones ALIZES chacune de type panchromatique, sont utilisées en entrée de l'algorithme. Par la suite, on souhaite tester les deux méthodes de partitioning proposées par FOTOTEX : Moving_window et Block. Le Moving_window, qui reprécisons-le, offre une résolution plus fine que Block. Ce détail est important car, rappelons-le, notre hypothèse serait qu'il y ait une possibilité pour que l'analyse de texture et les données sur les gîtes larvaires se corrèlent mieux avec une résolution plus fine. Ainsi, on spécifie une taille de

fenêtre de 67 et 135 pixels. On obtient en sortie des images RGB selon les paramètres entrés selon le découpage, la taille de fenêtre et la méthode (fig 10).

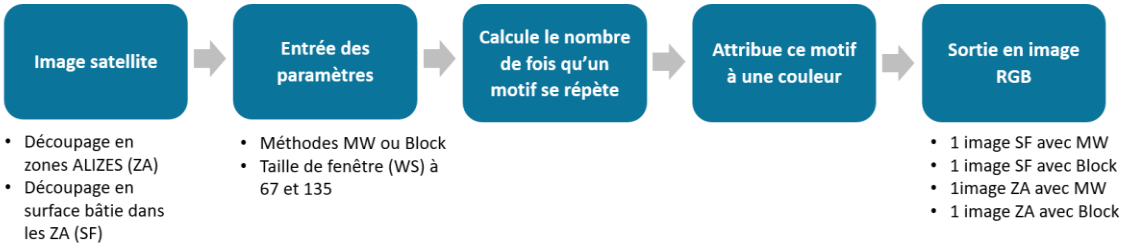


Figure 10 : Schéma de synthèse du processus de fonctionnement de l'algorithme FOTOTEX

Moyenne des rasters dans les zones ALIZES

On extrait chaque bande de chaque sortie FOTOTEX de façon distincte sous OTB. On applique ensuite une statistique de zone (sous QGIS) sur les indices radiométriques (NDVI, NDWI, IB), les bandes des sorties FOTOTEX et le raster d'altitude, pluies et température, pour obtenir la moyenne de chaque variable dans chaque zone ALIZES.

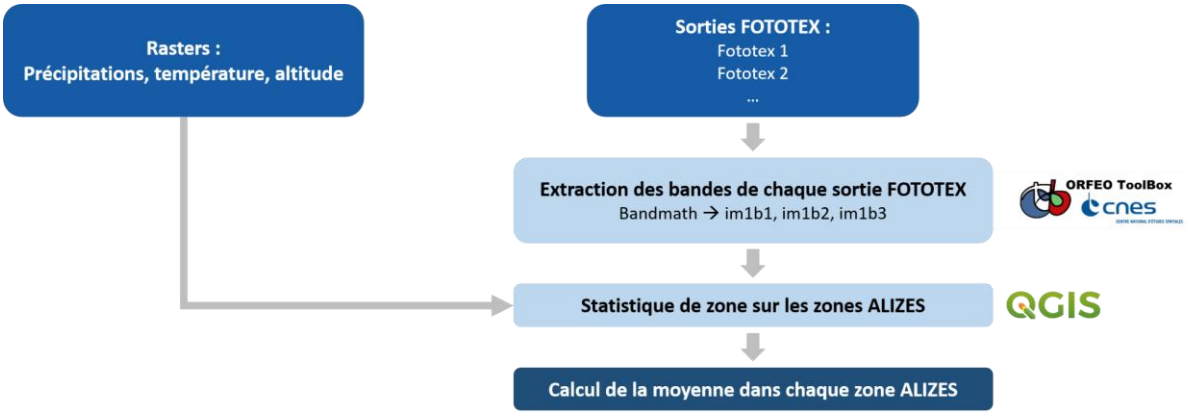


Figure 12 : **Schéma synthétique de la méthode des moyennes des rasters dans les zones ALIZES**

Il faut noter que pour les sorties FOTOTEX, différents tests ont été effectués selon 3 paramètres:

- Taille de fenêtre (WS = 67 ; WS = 135)

On procède d'abord au lancement de l'algorithme en entrant un seul choix de taille de fenêtre, un premier test est effectué à 67 pixels et un autre à 135 pixels.

- Méthode partitioning (Moving window ; Block)

On opte pour le choix de calcul, avec d'abord une première méthode en Block, puis avec une autre méthode en Moving window.

- Découpage de la mosaïque de La Réunion (Surface bâtie (SF) et zones ALIZES (ZA))

Pour l'image satellite sur laquelle on souhaite appliquer la taille de fenêtre et la méthode partitioning, on entre notre mosaïque Pléiades panchromatique découpée en surface bâtie dans un premier temps, puis on relance l'algorithme avec un découpage en zone ALIZES.

2.2.4. Analyse statistique

Définitions

Un modèle sert à expliquer et décrire les mécanismes du phénomène considéré (L. Rouvière, 2015). Lorsqu'on parle de modèle linéaire, il s'agit d'un modèle mathématique utilisé pour évaluer les effets de variables explicatives de type numérique (dans notre cas elles correspondent aux données sur les indices radiométriques, les facteurs environnementaux non anthropiques (altitude, température et précipitations), pourcentage des bâtiments et végétation, et les bandes FOTOTEX extraites) sur une variable à expliquer (le nombre de gîtes potentiels pour 100 maisons ici), qui doit obligatoirement être de type numérique continue. Quant au modèle linéaire généralisé (GLM), il s'agit d'une extension des modèles linéaires classiques qui peuvent être utilisés lorsque les réponses ne sont pas de type numérique continue.

Analyse univariée et multivariée

Les données de comptage sur le nombre de gîtes potentiels pour 100 maisons représentent notre variable à expliquer et le reste nos variables explicatives. Le but étant d'observer s'il existe une quelconque corrélation entre chacune de nos variables explicatives et les gîtes larvaires. Pour le vérifier, on procède dans un premier temps par une analyse univariée en effectuant un test de corrélation entre les données de gîtes et les autres variables explicatives dans R, en se basant sur le p-value donné durant le test. Ce p-value est une valeur critique souvent utilisée dans les tests pour rejeter ou non une hypothèse. Fisher (1925) a publié un livre expliquant l'utilisation des statistiques et a fixé une valeur critique de 0,05, considérée aujourd'hui comme référence pour jauger de la qualité statistique d'une expérience. Ainsi, si le p-value noté λ est inférieur à 0,05, on considère la variable comme pertinente, et inversement, si elle est supérieure alors le test est non concluant. On sélectionne alors parmi nos variables (bandes extraites, environnementales non anthropiques, pourcentage végétation et bâtis, et indices radiométriques) considérées comme les plus pertinentes par rapport à nos données sur les gîtes, si leur p-value < 0,05.

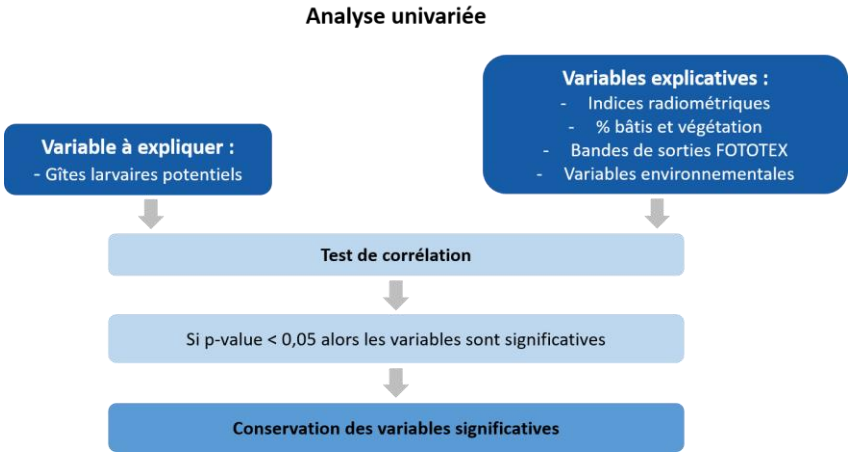


Figure 13 : Schéma de la méthode statistique en analyse univariée

Dans un second temps grâce à une analyse multivariée sur les variables sélectionnées dans l'étape univariée et non corrélées entre elles, on ajuste pour chaque espèce les GLM, en instaurant une distribution de Poisson en utilisant le package "MASS" dans R. Le GLM utilise une distribution de Poisson, car ayant des données de type comptage, celles-ci suivent théoriquement une loi de Poisson.

Plusieurs modèles sont construits selon les paramètres d'entrée de FOTOTEX (la taille de fenêtre, la méthode partitioning et le découpage de la mosaïque), couplés aux variables météorologiques, indices radiométriques et d'autres variables (pourcentage de végétation et bâtis, altitude).

Le critère d'information d'Akaike (AIC) (Akaike, 1974) est appliqué pour sélectionner le meilleur modèle. Ce critère dépend du nombre de variables que constitue le modèle donnant une valeur ne possédant pas de limite. Plus la valeur est petite, plus le modèle est considéré comme meilleur pour la prédiction.

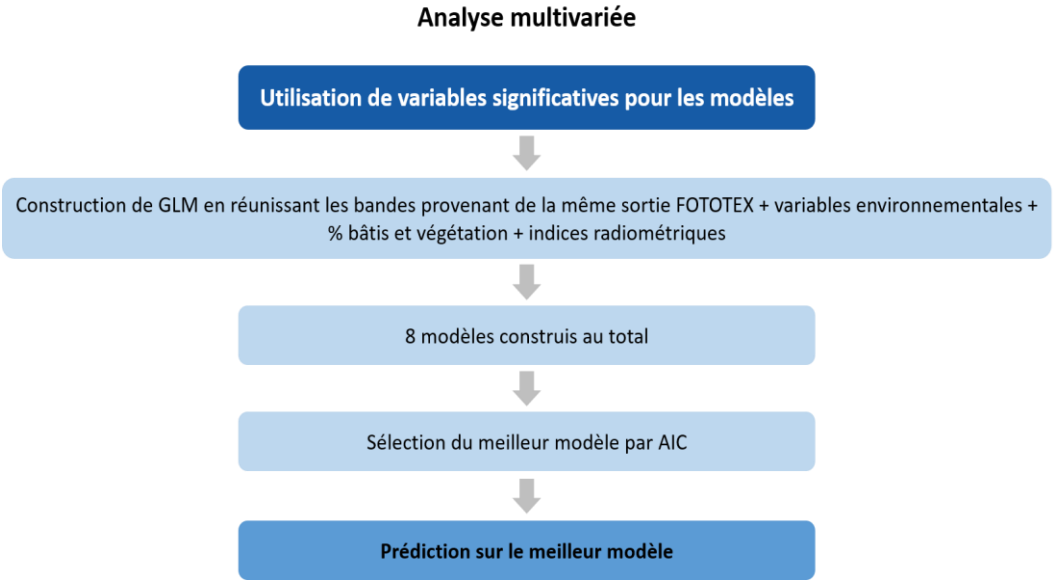


Figure 14 : Schéma de la méthodologie de l'analyse multivariée

2.2.5. Prédiction du nombre de gîtes

On applique ensuite une fonction prédictive à partir du meilleur modèle, afin de calculer pour l'ensemble des 1203 zones ALIZES le nombre de gîtes larvaires d'*Ae. albopictus*. Le calcul est effectué sous QGIS, par le calcul :

$$Y = exp(intercept + b1 * variable\,1 + b2 * variable\,2 + \ldots + bn * variable\,n)$$

Y : variable à expliquer

Intercept : coefficient directeur de la droite

b1, b2, bn : coefficients

Variable 1, 2, n : variables explicatives

On compare les données de gîtes réelles observées, avec les valeurs prédites obtenues par le modèle prédictif.

3. Résultats

3.1. Textures en milieu urbain sous FOTOTEX

Les sorties FOTOTEX obtenues par la mosaïque Pléiades panchromatique en entrée, ont été paramétrées de sorte à faire ressortir les quartiers. L'algorithme donne en sortie une représentation texturale relativement bonne des quartiers. La figure 15 montre un exemple de sortie obtenue, sur laquelle on observe différentes typologies de quartiers représentées par différentes couleurs. En rouge les quartiers plus denses, avec des bâtiments très rapprochés ; en vert avec de peu d'habitations et la présence de zones industrielles marquées par de larges bâtiments ; et en bleu les zones ayant des bâtiments plus distants, séparé par de la végétation. Le fait de discriminer selon la surface bâtie (SF) a montré une texture plus fidèle de la réalité dans la distribution spatiale des bâtiments sur l'ensemble de La Réunion à une taille de fenêtre de 67 pixels par la méthode partitioning en Block. La discrimination en zone ALIZES (ZA) présente également une bonne représentation des quartiers, mais reste moins bonne, de même pour la taille de fenêtre à 135 pixels et pour la méthode partitioning en Moving window.

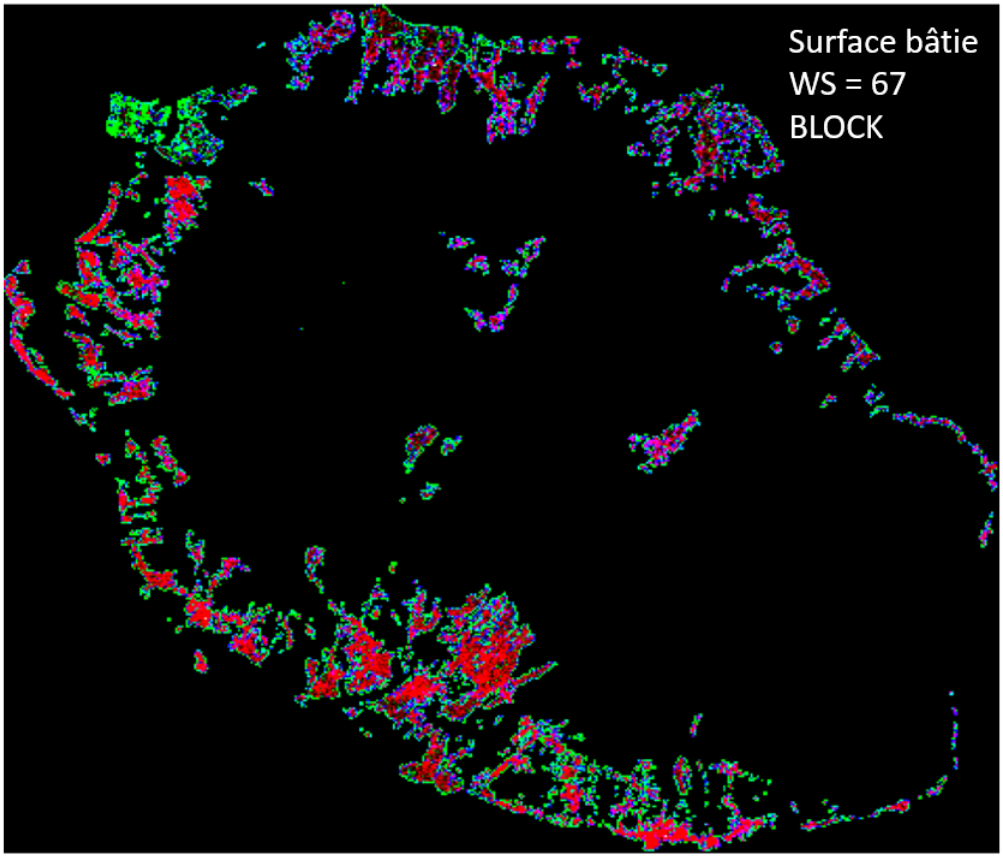


Figure 15 : Exemples de sorties FOTOTEX

3.2. Approche statistique

3.2.1. Analyse univariée

En appliquant des tests de corrélations entre les gîtes et l'ensemble des variables explicatives, on repère quelques corrélations significatives. En effet, il existe des corrélations positives ou négatives avec toutes nos variables (Tableau 1). Pour les indices radiométriques, le NDVI corrèle de façon positive, signifiant que les zones végétalisées ont un impact. Le NDWI et l'indice de brillance (IB) corrèle très peu et de façon négative, mais avec un p-value très inférieure à 0,05, sous-entendant une relation avec la reproduction des gîtes qui s'avèrent plus conséquente au niveau des zones périurbaines. Pour les indices de texture (variables FOTOTEX), un résultat étonnant ressort, car presque tous les indices de texture corrèlent de façon négative ou positive par rapport au nombre de gîtes larvaires potentiels. Pour le pourcentage de végétation, on a une corrélation positive, a contrario, on a une corrélation négative pour le pourcentage de bâtiment. En ce qui concerne les variables environnementales, les précipitations se corrèlent le plus et de façon négative, indiquant que plus on a de précipitations, et moins les personnes vont stocker l'eau et donc moins de gîtes larvaires potentiels disponibles. Ces lieux varient également avec l'altitude. Une information que ce test de corrélation apporte, est de pouvoir extraire quelles sont les variables significatives par rapport au nombre de gîtes larvaires potentiels à utiliser pour la construction des modèles en multivariée.

Tableau 1 : Corrélations et p-value de chaque variables explicatives selon le nombre de gîtes potentiels par maisons visitées pour 100 maisons

Les valeurs colorées en marron représentent les variables les plus pertinentes par rapport aux données sur les gîtes ; les données colorées en blanc ne sont pas pertinentes

Variables explicatives	Corrélations	P-value	
NDVI	0,66	< 2 e-16	Indices radiométrique
NDWI	- 0,28	7,24 e-09	
IB	- 0,0067	<2 e-16	Variables FOTOTEX
B1_67_ZA	0,0426	<2 e-16	
B2_67_ZA	- 0,2079	0,000185	
B3_67_ZA	- 0,273	<2 e-16	
B1_135_ZA	0,0270	<2 e-16	
B2_135_ZA	0,0842	<2 e-16	
B3_135_ZA	0,00728	0,0585	
B1_67_SF	0,0398	<2 e-16	
B2_67SF	0,00278	0,616	
B3_67_SF	-0,0862	<2 e-16	
B1_135_SF	0,018	<2 e-16	
B2_135_SF	0,0467	<2 e-16	
B3_135_SF	0,0143	0,000695	
B1_MW67_ZA	0,0533	<2 e-16	
B2_MW67_ZA	-0,0541	<2 e-16	
B3_MW67_ZA	-0,264	<2 e-16	
B1_MW67_SF	0,0488	<2 e-16	
B2_MW67_SF	0,00938	0,106	
B3_MW67_SF	- 0,0588	<2 e-16	
B1_MW135_Z	0,04	<2 e-16	
B2_MW135_Z	0,139	<2 e-16	
B3_MW135_Z	0,0378	8,83 e-14	
B1_MW135_S	0,0269	<2 e-16	
B2_MW135_S	-0,0977	<2 e-16	
B3_MW135_S	0,0118	0,0124	
% Veg	0,00447	<2 e-16	%
% batis	- 0,0115	<2 e-16	
Tmoy_mean	- 0,0305	<2 e-16	Variables environnementales non anthropiques
P_mean	-3,232 e-04	<2 e-16	
Alti_mean	4,427 e-04	<2 e-16	

3.2.2. Analyse multivariée des modèles statistiques d'estimation du nombre de gîtes

Parmi les résultats de l'analyse multivariée, la sélection du meilleur modèle par AIC désigne le modèle avec un découpage de la mosaïque en surface bâtie, à une taille de fenêtre de 67 pixels, par méthode partitioning en Block, comme étant le meilleur avec la plus faible valeur d'AIC.

Le modèle présente des corrélations satisfaisantes avec des p-value pertinents avec nos données de gîtes (Tableau 2). Chaque variable est donc essentielle et aucune ne peut être supprimée. On observe des corrélations positives pour le NDVI, la température, le pourcentage de végétation et de bâtis, et la bande 1 de la sortie FOTOTEX. Ceci montre le fait que plus on a de végétation, plus on a de gîtes larvaires potentiels. De plus, la présence de jardins en zone urbaine offre la possibilité de formations de gîtes larvaires potentiels par *Aedes albopictus*. Des corrélations négatives sont également existantes pour le NDWI, l'indice de brillance, la bande 3 de la sortie FOTOTEX et les précipitations, démontrant que moins il y a de précipitations et plus on a de gîtes larvaires potentiels qui tendent à se former.

Tableau 2 : Variables significatives du meilleur modèle avec les valeurs de corrélations estimées et leur p-value

Variables significatives	**Corrélations estimées**	**p-value**
NDVI	7,522e+00	< 2e-16
NDWI	- 7,922e+00	< 2e-16
IB	-8,727e-03	3,42e-14
Précipitations	-2,538e-04	< 2e-16
Température	9,305e-03	< 2e-16
% végétation	1,368e-02	5,52e-08
% bâtiment	2,027e-02	5,96e-14
Bande 1	2,235e-02	< 2e-16
Bande 2	-2,108e-01	< 2e-16

Suite à la sélection du meilleur modèle, la prédiction a pu être réalisée sous-représentation graphique (fig 16). En abscisse se trouve nos valeurs observées provenant des données de terrain et en ordonnée les valeurs prédites par le meilleur modèle. On constate que quelques valeurs semblent sous-estimées ou surestimées par rapport aux valeurs observées. Ces valeurs prédites sont des valeurs estimées du nombre de gîtes présents pour 100 maisons, il est plausible qu'il y ait une marge d'erreur existante entre les données de observées et les prédictions. Cependant, l'ensemble du modèle donne lieu à un résultat relativement satisfaisant, démontrant qu'il est possible d'appliquer la texture dans un modèle prédictif pour définir une estimation des gîtes dans les maisons, en combinaison des indices environnementaux (température, précipitations, altitude), du pourcentage de végétation et de bâtis, et d'indices radiométriques.

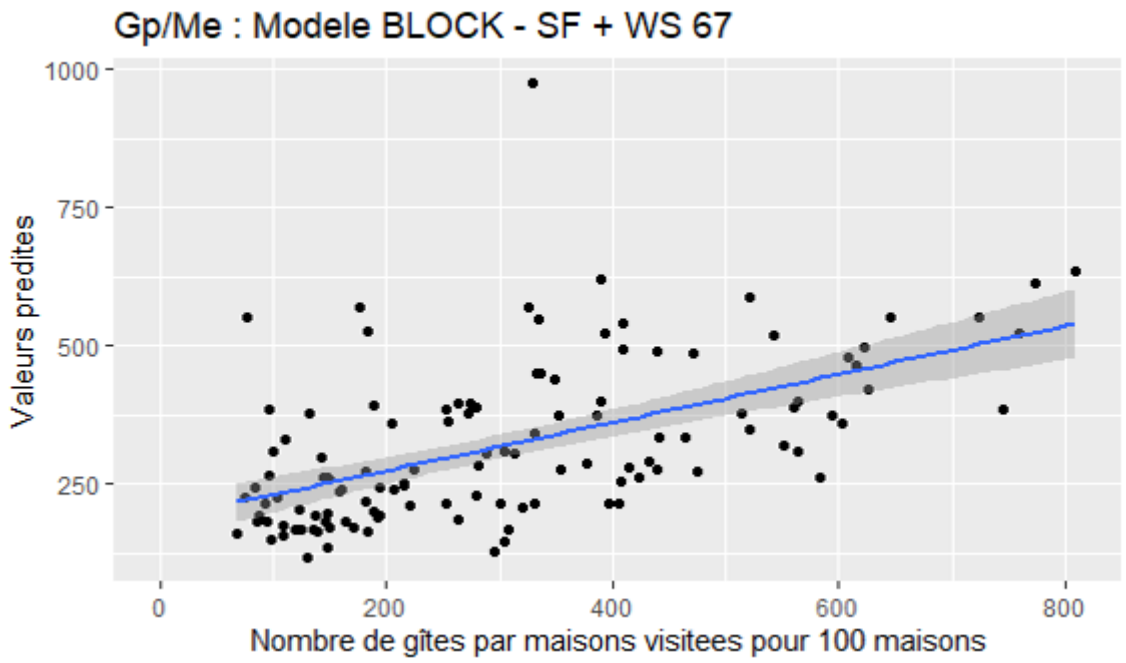


Figure 16 : Graphique des prédictions du nombre de gîtes par maisons visitées pour 100 maisons

Ce modèle permet d'estimer les zones à risques potentiels de transmission de maladies par moustiques vecteurs dans les zones ALIZES (fig 17). On constate que la quantité de gîtes est moins prépondérante dans la région Est de l'île, représentative de la réalité en raison des précipitations plus communes, mais aussi du fait que les gens ont tendance à moins arroser, ne permettant donc pas de laisser place à des eaux stagnantes. On prédit également davantage de gîtes dans les quartiers périphériques que dans les centres-villes, où la végétation est plus présente. Par ailleurs, d'après le dernier rapport épidémiologique (8 juin 2021) du suivi des cas de dengue à La Réunion par Santé publique France, les zones affectées se situent principalement à l'Ouest de l'île. La commune de St Paul est la plus affectée, dans le Sud, le foyer à St Joseph reste actif, et les cas ne cessent de s'accroître à St Pierre. En considérant cela, le modèle prédictif répond bien de façon cohérente à la situation actuelle. En effet, le modèle présente également un risque de recrudescence dans les régions Ouest et Sud. Ces régions sont les plus propices à la répartition des *Aedes albopictus*, de par les conditions climatiques favorables. L'Ouest étant une région sèche, les eaux d'origines anthropiques ou naturelles ont tendance à stagner ou à être stockées. Dans la région Sud, la végétation est bien plus dense, ce qui pourrait notamment expliquer que St-Joseph soit le foyer de la dengue. De plus, les résultats du meilleur modèle obtenu concernant les indices de végétations permettent d'appuyer cette observation.

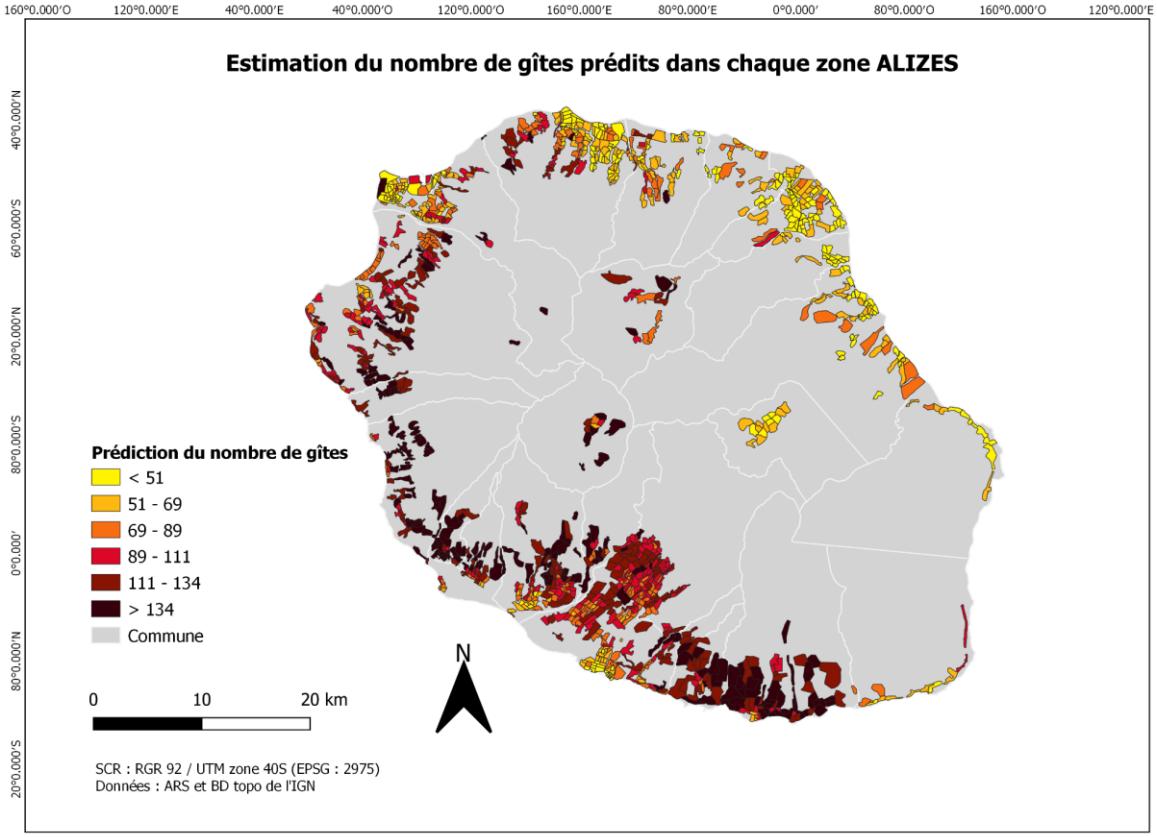


Figure 17 : Prédiction du nombre de gîtes estimées pour 100 maisons dans chaque zone ALIZES

4. Discussion

4.1. Résultats biologiques

Les corrélations positives observées dans le tableau 2 avec le NDVI, la température, le pourcentage de végétation, la bande 1 de la sortie FOTOTEX et le pourcentage de bâtis, a montré que la végétation joue un rôle important dans la formations de gîtes larvaires potentiels. Ces résultats ont montré qu'*Aedes albopictus* est plus abondant dans les couvertures végétales plus denses, représenté au niveau des zones périurbaines. De plus, ces zones sont plus humides et à une température favorable pour leur survie. Une observation effectuée directement sur le terrain durant la campagne de collecte de données, a été que les moustiques avaient tendance à se réfugier dans les arbres fruitiers présents parfois en milieu urbain, tels que les manguiers par exemple. Le fait qu'il existe une corrélation positive avec le pourcentage de bâtis peut notifier de la présence de végétation parfois dense, dans les jardins, leur permettant ainsi de se propager dans les maisons voisines. Les corrélations négatives avec le NDWI, l'indice de brillance, la bande 3 de la sortie FOTOTEX et les précipitations, dénoncent que plus d'urbanisation et moins il y a de gîtes larvaires potentiels. En effet, les zones présentant une pluviométrie importante donnent lieu à un nombre de gîtes larvaires plus faibles (< 51), notamment dans l'Est, car celles-ci ne peuvent rester en place. De plus, ces corrélations démontrent l'existence d'eaux stagnantes en milieu urbain par l'indice NDWI, qui peuvent être de nature anthropiques ou naturelles dans la région Ouest notamment et Sud. Ainsi, les modifications de l'environnement dues à l'activité humaine peuvent modifier drastiquement la population d'*Aedes albopictus*. En effet, celles-ci peuvent se regrouper dans

les parcs, jardins résidentiels et cimetières. Cependant, elles restent absentes dans les zones très urbanisées avec peu de végétation. Par ailleurs, ces résultats corrèlent avec d'autres études dont Honorio et al (2009), Sivan et al (2015) et Paupy et al (2001), qui ont montré qu'*Aedes albopictus* peut être absent dans les villes densément peuplées, manquant de végétation et qu'ils sont plus présents au niveau des couvertures végétale plus denses.

Il est néanmoins bien de noter, que malgré le fait que le nombre de gîtes est moindre dans les zones à très fortes activités humaines, ne signifie pas que le risque est nul. En effet, l'augmentation de cas de dengue peut être causée également par l'augmentation des déplacements humains, la croissance démographique et à l'urbanisation incontrôlée (Paupy et al, 2001). Le problème de l'importation de moustiques et de virus de la dengue provenant de voyageurs porteurs de virus de la dengue est d'ailleurs une préoccupation majeure, sur lequel il faut porter une attention particulière, où les regroupements de personnes sont plus fréquents en raison de nombreuses activités culturelles, de loisirs ou autres à effectuer.

4.2. Une méthode originale et opérationnelle

La méthode utilisée durant cette étude mettant en place l'application la télédétection et la texture, couplée à d'autres variables (NDVI, précipitations, etc) pour l'estimation du nombre de gîtes, n'était pas chose aisée. En effet, les gîtes larvaires d'*Aedes albopictus* étant très petits, et non observables sur une image satellite, contrairement à d'autres moustiques, dont les Anophèles vecteurs du paludisme, pour lesquelles les gîtes de prédilections sont les rizières, les marais, où la télédétection est plus facilement applicable. Cependant, notre étude a démontré qu'il est possible de prédire le nombre de gîtes larvaires potentiels. De plus, la rapidité dans la classification non supervisée sous FOTOTEX pour les indices de textures permet de fournir plusieurs données utiles à nos modèles et apporte des résultats satisfaisants. De plus, l'algorithme donne le choix à l'utilisateur pour l'entrée des paramètres, ce qui favorise la compréhension de nos résultats et de les ajuster au mieux pour l'analyse effectuée. L'analyse de texture et le supplément de données météorologiques et environnementales offrent une méthode opérationnelle pour l'ARS, qui peut faire l'objet d'une bonne estimation de gîtes dans les zones difficiles d'accès, ou comme complément des données de terrain. Bien que le modèle puisse être opérationnel dans la prédiction de gîtes, il faut prendre en compte le fait qu'il possède des limites dans ces prédictions. Si les données d'observations apportent une valeur très surélevée qu'à l'accoutumé, le modèle ne peut les prédire. Néanmoins, il reste très satisfaisant et cohérent, et pourrait également être appliqué à d'autres endroits qu'à La Réunion.

Conclusion

En conclusion de cette étude, nous avons pu mettre en pratique une méthode originale visant à estimer le nombre de gîtes en milieu urbain, par analyse de texture. Cette application a donné lieu à une bonne prédiction des zones favorables au moustique tigre vecteur de maladies. L'apport d'une image à très haute résolution spatiale est un plus en ce qui concerne la précision pour la représentation des quartiers, une perspective serait donc d'appliquer cette méthode par le biais d'une image à haute résolution spatiale, afin de voir si la résolution influence les résultats ou non. La méthode employée dans ce modèle pourra également être opérationnelle par l'ARS, et peut également être utilisée en entrée de l'outil ARBOCARTO.

Remerciements

Je tiens à remercier :

- Ma tutrice Annelise Tran pour avoir été toujours aussi souriante et bienveillante, d'avoir été présente et pédagogique durant mon stage. Mais aussi pour les bons moments partagés et les sorties de terrain organisées, offrant des moments de convivialité et de partage. Je la remercie également pour les nombreuses présentations effectuées, qui m'ont permis de développer une aisance à l'oral. Elle m'a offert l'opportunité d'ouvrir mon champ de vision au niveau professionnel et personnel et d'enrichir mon expérience au sein du CIRAD.

- Mon second tuteur Thibault Catry, notamment pour ces nombreux conseils et sa pédagogie. Bien qu'éloigné, il restait très présent et à l'écoute si nécessaire.

- Claire Teillet et Benjamin Pillot pour l'importance qu'ils ont eue pour mon travail et leur aide apportée durant mon stage.

- L'ARS, dont Nausicaa pour m'avoir donné la chance d'être présente sur le terrain durant la prospection des jardins pendant le porte à porte, mais aussi pour les discussions intéressantes, sa gentillesse et les bons moments passés. J'en profite également pour remercier les deux autres personnes qui nous ont accompagnés sur le terrain durant le porte à porte pour leur sympathie et leurs encouragements pour la suite. J'applaudis également son efficacité dans le travail, qui m'a permis de comprendre bien plus de choses sur le comportement des moustiques. Je remercie aussi l'ensemble de l'équipe de l'ARS pour nous avoir accueillis pour les présentations des résultats de mon stage.

- Marlène Dupraz, pour sa grande gentillesse, ces ondes positives, sa douceur et ces encouragements motivants. Son aide a toujours été très précieuse et rassurante.

- Thierry pour sa personnalité atypiquement drôle associé à un sérieux sans faille.

- Miguy pour sa bonne humeur et nos éclats de rire, nos discussions et les moments de partage.

- Antonin Leclerc pour nos longues discussions toutes enrichissantes et drôles, sa bienveillance et son intérêt pour mon travail, et son aide apporté avec beaucoup de gentillesse.

- Brice et Mickaël pour leur grande joie de vivre, le vent frais qu'ils apportaient par leur personnalité amenait une atmosphère rafraîchissante et agréable.

- Cécile, Anne-Sophie, Eric et Anaïs pour la bonne humeur, le sérieux dans leur travail qui était un exemple pour moi.

- Tous les stagiaires avec qui j'ai été amenée de discuter et de faire connaissance, avec qui j'ai partagé des moments plus qu'agréables et très drôles. Tout a commencé à partir de

rien, et maintenant des amitiés sont nées, c'est un des plus cadeaux obtenus durant ce stage.

Un très grand merci à tous !

Bibliographie

ADDE, Antoine. *Télédétection et paludisme en Guyane: déterminants environnementaux de la distribution et de la densité des moustiques anophèles*. 2016. Thèse de doctorat. Antilles.

AKAIKE, Hirotugu. A new look at the statistical model identification. *IEEE transactions on automatic control*, 1974, vol. 19, no 6, p. 716-723.

ALTO, Barry W. et JULIANO, Steven A. Precipitation and temperature effects on populations of Aedes albopictus (Diptera: Culicidae): implications for range expansion. *Journal of medical entomology*, 2001, vol. 38, no 5, p. 646-656.

BILLEY, Antoine. *Synergie des données Sentinel optiques et radar pour l'observation et l'analyse de la végétation du littoral du Pays de Brest*. 2018. Thèse de doctorat. LETG, UMR6554, Institut Universitaire Européen de la Mer, Technopôle Brest-Iroise, Place Nicolas Copernic, 29280 Plouzané.

BOYER, Sebastien, FORAY, Coralie, et DEHECQ, Jean-Sebastien. Spatial and temporal heterogeneities of Aedes albopictus density in La Reunion Island: rise and weakness of entomological indices. *PLoS One*, 2014, vol. 9, no 3, p. e91170.

BRYNOLFSSON, Patrik, NILSSON, David, TORHEIM, Turid, *et al.* Haralick texture features from apparent diffusion coefficient (ADC) MRI images depend on imaging and pre-processing parameters. *Scientific reports*, 2017, vol. 7, no 1, p. 1-11.

CHOWDHURY, Sujan, VERMA, Brijesh, et STOCKWELL, David. A novel texture feature based multiple classifier technique for roadside vegetation classification. *Expert Systems with Applications*, 2015, vol. 42, no 12, p. 5047-5055.

CONNERS, Richard W. et RW, CONNERS. Towards a set of statistical features which measure visually perceivable qualities of textures. 1979.

COUTERON, Pierre, BARBIER, Nicolas, et GAUTIER, Denis. Textural ordination based on Fourier spectral decomposition: a method to analyze and compare landscape patterns. *Landscape Ecology*, 2006, vol. 21, no 4, p. 555-567.

CUNZE, Sarah, KOCH, Lisa K., KOCHMANN, Judith, *et al.* Aedes albopictus and Aedes japonicus-two invasive mosquito species with different temperature niches in Europe. *Parasites & vectors*, 2016, vol. 9, no 1, p. 1-12.

DELLA VENOVA, Claire. Introduction aux GLM. Lien : *https://delladata.fr/introduction-aux-glm/*

DELL'ACQUA, Fabio et GAMBA, Paolo. Texture-based characterization of urban environments on satellite SAR images. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, vol. 41, no 1, p. 153-159.

DOS SANTOS, Taissa Pereira. *Invasion d'Aedes albopictus dans les milieux forestiers tropicaux et potentiel pour l'émergence de virus zoonotiques au Brésil*. 2019. Thèse de doctorat. Université Montpellier.

ECDC (Centre européen de prévention et de contrôle des maladies) *Transmission du Zika*. 2018. Site officiel. https://www.ecdc.europa.eu/en/zika-virus-infection/threats-and-outbreaks/zika-transmission

FISCHER, R. A. Statistical methods for research workers, 1925. *Edinburgh Oliver Boyd*, 1944, vol. 518.

HAMON, Jacques. Etude biologique et systématique des Culicidae de l'Ile de La Réunion. 1953.

HARALICK, Robert M., SHANMUGAM, Karthikeyan, et DINSTEIN, Its' Hak. Textural features for image classification. *IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics*, 1973, no 6, p. 610-621.

HARAMBOURE, Marion. *Modélisation de la dynamique des populations naturelles d'Aedes albopictus et réponse à la lutte anti-vectorielle.* 2020. Thèse doctorat. Université de Montpellier.

HAWLEY, William A. The biology of Aedes albopictus. *Journal of the American Mosquito Control Association. Supplement*, 1988, vol. 1, p. 1-39.

Hien DS 1975. Biologie d' *Aedes aegypti* (L., 1762) et d' *Aedes albopictus* (Skuse, 1865) (Diptera, Culicidae). *Acta Parasitol. Pol.*23: 553-568.

HONÓRIO, Nildimar Alves, CASTRO, Márcia Gonçalves, BARROS, Fábio Saito Monteiro de, *et al.* The spatial distribution of Aedes aegypti and Aedes albopictus in a transition zone, Rio de Janeiro, Brazil. *Cadernos de Saúde Pública*, 2009, vol. 25, p. 1203-1214.

Hurlbut H. S. 1973. The effect of environmental temperature upon the transmission of St. Louis encephalitis virus by *Culex pipiens quinquefasciatus*. *J. Med. Entomol.*10: 1–12.

JEANSOULIN, Robert et MAINGUENAUD, Ph. Classification neuronale des textures de milieux terrestres naturels en télédétection radar. *Cybergeo: European Journal of Geography*, 2000.

KRAEMER, Moritz UG, SINKA, Marianne E., DUDA, Kirsten A., *et al.* The global distribution of the arbovirus vectors Aedes aegypti and Ae. albopictus. *elife*, 2015, vol. 4, p. e08347.

LANG, Marc, ALLEAUME, Samuel, LUQUE, Sandra, *et al.* Landscape Structure Estimation using Fourier-Based Textural Ordination of High Resolution Airborne Optical Image. In : *IGARSS 2018-2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. IEEE, 2018. p. 6600-6603.

LEFEBVRE, Antoine. *Contribution de la texture pour l'analyse d'images à très haute résolution spatiale: application à la détection de changement en milieu périurbain*. 2011. Thèse de doctorat. Université Rennes 2; Université Européenne de Bretagne.

LOWE, Sarah, BROWNE, Michael, BOUDJELAS, Souyad, *et al. 100 of the world's worst invasive alien species: a selection from the global invasive species database*. Auckland : Invasive Species Specialist Group, 2000.

L. Rouvière. Introduction aux GLM. 2015. Lien :

https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwiP8cjOlbfwAhVNUMAKHfyGCOsQFjADegQIBBAD&url=https%3A%2F%2Fperso.univ-rennes2.fr%2Fsystem%2Ffiles%2Fusers%2Frouviere_l%2Fchapitre1_glm.pdf&usg=AOvVaw3nB4suIZieinDp3UKG0SzV

MARTI, Renaud, LI, Zhichao, CATRY, Thibault, *et al.* A mapping review on urban landscape factors of dengue retrieved from earth observation data, GIS techniques, and survey questionnaires. *Remote Sensing*, 2020, vol. 12, no 6, p. 932.

MATSUYAMA, Takashi, MIURA, Shu-Ichi, et NAGAO, Makoto. Structural analysis of natural textures by Fourier transformation. *Computer vision, graphics, and image processing*, 1983, vol. 24, no 3, p. 347-362.

MURRAY, Humphrey, LUCIEER, Arko, et WILLIAMS, Raymond. Texture-based classification of sub-Antarctic vegetation communities on Heard Island. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2010, vol. 12, no 3, p. 138-149.

Parker M. B. 1986. Hatchability of eggs of *Aedes taeniorhynchus* (Diptera: Culicidae): effects of different temperatures and photoperiods during embryogenesis. *Ann. Entomol. Soc. Am.*79: 925–930.

PAUPY, Christophe, GIROD, Romain, SALVAN, Maximin, *et al.* Population structure of Aedes albopictus from La Reunion Island (Indian Ocean) with respect to susceptibility to a dengue virus. *Heredity*, 2001, vol. 87, no 3, p. 273-283.

PAUPY, Christophe, DELATTE, Hélène, BAGNY, Leila, *et al.* Aedes albopictus, an arbovirus vector: from the darkness to the light. *Microbes and infection*, 2009, vol. 11, no 14-15, p. 1177-1185.

PROISY, Christophe, COUTERON, Pierre, et FROMARD, François. Predicting and mapping mangrove biomass from canopy grain analysis using Fourier-based textural ordination of IKONOS images. *Remote Sensing of Environment*, 2007, vol. 109, no 3, p. 379-392.

QUEVEDO, Roberto, MENDOZA, Fernando, AGUILERA, J. M., *et al.* Determination of senescent spotting in banana (Musa cavendish) using fractal texture Fourier image. *Journal of Food Engineering*, 2008, vol. 84, no 4, p. 509-515.

QUEVEDO, Roberto, JARAMILLO, Marcela, DÍAZ, Oscar, *et al.* Quantification of enzymatic browning in apple slices applying the fractal texture Fourier image. *Journal of Food Engineering*, 2009, vol. 95, no 2, p. 285-290.

RATTI, Carlo et RICHENS, Paul. Urban texture analysis with image processing techniques. In : *Computers in building*. Springer, Boston, MA, 1999. p. 49-64.

REINHOLD, Joanna M., LAZZARI, Claudio R., et LAHONDÈRE, Chloé. Effects of the environmental temperature on Aedes aegypti and Aedes albopictus mosquitoes: a review. *Insects*, 2018, vol. 9, no 4, p. 158.

ROIZ, David, ROSA, Roberto, ARNOLDI, Daniele, *et al.* Effects of temperature and rainfall on the activity and dynamics of host-seeking Aedes albopictus females in northern Italy. *Vector-Borne and Zoonotic Diseases*, 2010, vol. 10, no 8, p. 811-816.

ROUSE, J. W., HAAS, Rüdiger H., SCHELL, John A., *et al.* Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *NASA special publication*, 1974, vol. 351, no 1974, p. 309.

Rueda L. M. Patel K. J. Axtell R. C. Stinner R. E. . 1990. Temperature-dependent development and survival rates of *Culex quinquefasciatus* and *Aedes aegypti* (Diptera: Culicidae). *J. Med. Entomol.*27: 892–898.

SIVAN, Arun, SHRIRAM, A. N., SUNISH, I. P., *et al.* Host-feeding pattern of Aedes aegypti and Aedes albopictus (Diptera: Culicidae) in heterogeneous landscapes of South Andaman, Andaman and Nicobar Islands, India. *Parasitology research*, 2015, vol. 114, no 9, p. 3539-3546.

SOTI, Valérie. *Caractérisation des zones et périodes à risque de la Fièvre de la Vallée du Rift au Sénégal par télédétection et modélisation éco-épidémiologique*. 2011. Thèse de doctorat. AgroParisTech.

TEILLET, Claire, *Télédétection et Santé en contexte urbain (Brasilia, Brésil): Analyse des paysages urbains par approches texturales et apports à la compréhension des mécanismes de transmission de la dengue*. 2019. Rapport de stage.

TRAN, Annelise, MANGEAS, Morgan, DEMARCHI, Marie, *et al.* Complementarity of empirical and process-based approaches to modelling mosquito population dynamics with Aedes albopictus as an example—Application to the development of an operational mapping tool of vector populations. *PloS one*, 2020, vol. 15, no 1, p. e0227407.

TUCKER, Compton J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote sensing of Environment*, 1979, vol. 8, no 2, p. 127-150.

WEBEL, Johannes, GOLA, Jessica, BRITZ, Dominik, *et al.* A new analysis approach based on Haralick texture features for the characterization of microstructure on the example of low-alloy steels. *Materials Characterization*, 2018, vol. 144, p. 584-596.

WOOD, Eric M., PIDGEON, Anna M., RADELOFF, Volker C., *et al.* Image texture as a remotely sensed measure of vegetation structure. *Remote Sensing of Environment*, 2012, vol. 121, p. 516-526.

World Health Organization. Vector control. *Technical report, World Health Organization, Regional Office for South-East Africa*, 2017

ZUCKER, Steven W. et TERZOPOULOS, Demetri. Finding structure in co-occurrence matrices for texture analysis. *Computer graphics and image*