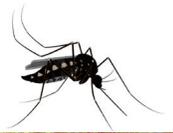


TÉLÉDÉTECTION ET MODÉLISATION SPATIALE

Applications à la surveillance et au contrôle
des maladies liées aux moustiques

Annelise Tran, Éric Daudé, Thibault Catry, coord.



Téledétection
et modélisation spatiale

Applications à la surveillance
et au contrôle des maladies
liées aux moustiques

Annelise Tran, Éric Daudé, Thibault Catry,
coordinateurs

Éditions Quæ

Collection Update Sciences & Technologies

Public policies and food systems
in Latin America
J.-F. Le Coq, C. Grisa, S. Guéneau,
P. Niederle, coord.
2022, 446 p.

La santé globale au prisme de l'analyse
des politiques publiques
S. Gardon, A. Gautier, G. Le Naour,
O. Faugère, R. Payre, coord.
2020, 248 p.

Méthodes d'investigation
de l'alimentation et des mangeurs
O. Lepiller, T. Fournier, N. Bricas,
M. Figuié, coord.
2021, 244 p.

Manger en ville
Regards socio-anthropologiques d'Afrique,
d'Amérique latine et d'Asie
A. Soula, C. Yount-André, O. Lepiller,
N. Bricas, J-P. Hassoun, coord.
2020, 172 p.

Eating in the city
Socio-anthropological perspectives
from Africa, Latin America and Asia
A. Soula, C. Yount-André, O. Lepiller,
N. Bricas, J-P. Hassoun, coord., D. Manley
(traduction)
2021, 158 p.

Cet ouvrage a bénéficié du soutien du Cirad et de l'IRD.

Pour citer cet ouvrage

Tran A., Daudé É., Catry T., coord., 2022. *Télé-détection et modélisation spatiale. Applications à la surveillance et au contrôle des maladies liées aux moustiques*, Versailles, Quæ, 148 p.

Éditions Quæ
RD 10, 78026 Versailles Cedex
www.quae.com – www.quae-open.com

© Éditions Quæ, 2022

ISBN (imprimé) : 978-2-7592-3628-2
ISBN (ePub) : 978-2-7592-3630-5

ISBN (pdf) : 978-2-7592-3629-9
ISSN : 1773-7923

Cet ouvrage est diffusé sous licence CC-by-NC-ND 4.0.

Table des matières

| | |
|---|----|
| Préface | 7 |
| Introduction générale | 11 |
| <i>Thibault Catry, Éric Daudé, Nadine Dessay, Annelise Tran</i> | |
| Notions de télédétection..... | 12 |
| Introduction aux systèmes d'information géographique..... | 15 |

PARTIE 1

INFORMATIONS SPATIALES POUR LA SURVEILLANCE DES MOUSTIQUES VECTEURS ET DES MALADIES ASSOCIÉES

| | |
|--|----|
| Chapitre 1. Liens entre moustiques vecteurs et environnement : apport des méthodes de télédétection satellite | 19 |
| <i>Renaud Marti, Claire Teillet, Hobiniaina Anthonio Rakotoarison, Florence Fournet</i> | |
| Liens entre moustiques vecteurs et environnement..... | 22 |
| Description de l'environnement par des approches de télédétection satellite..... | 27 |
| Références..... | 37 |
| Chapitre 2. Indices spectraux et classifications d'images multispectrales pour la cartographie du risque vectoriel | 43 |
| <i>Annelise Tran, Renaud Marti, Vincent Herbreteau</i> | |
| Cartographie de l'occupation du sol par télédétection pour modéliser la distribution des moustiques <i>Anopheles</i> en Camargue..... | 45 |
| Indices spectraux dérivés d'images de télédétection, comme facteurs environnementaux des cas humains de fièvre du Nil occidental en Europe..... | 47 |
| Production automatisée d'indices spectraux : exemple de l'outil Sen2Extract..... | 49 |
| Références..... | 51 |
| Chapitre 3. Estimation des températures de l'air à partir d'images satellite et de stations météorologiques | 53 |
| <i>Barbara Boufhal, Alexandre Cebeillac, Éric Daudé</i> | |
| Des données pour mesurer les températures..... | 53 |
| Estimation des températures de l'air : différentes méthodes..... | 54 |
| Applications à Bangkok..... | 56 |
| Conclusion..... | 61 |
| Références..... | 61 |

Chapitre 4. Du recensement au bâtiment : génération de populations synthétiques... 63

Alexandre Cebeillac, Olivier Gillet, Éric Daudé

| | |
|---|----|
| Désagréger et redistribuer la population | 64 |
| Population synthétique, une méthodologie au service d'une analyse spatiale fine des problématiques de santé | 69 |
| Conclusion | 71 |
| Références | 71 |

Chapitre 5. Texture des images satellite et caractérisation des milieux urbains favorables aux moustiques vecteurs 73

Claire Teillet, Ophélie Hoarau, Nausicaa Habchi-Hanriot, Benjamin Pillot, Thibault Catry, Annelise Tran

| | |
|--|----|
| Différentes méthodes pour caractériser la texture d'une image | 74 |
| Étude des relations entre variables urbaines et distribution des cas de dengue à Brasilia par une approche texturale | 76 |
| Cartographie de la distribution des gîtes larvaires potentiels du moustique-tigre à La Réunion | 79 |
| Conclusion | 82 |
| Références | 83 |

PARTIE 2

ANALYSER ET PRÉDIRE L'EFFET DE VARIABLES ENVIRONNEMENTALES SUR LA DISTRIBUTION ET LA DYNAMIQUE DES MOUSTIQUES VECTEURS

Chapitre 6. Modèles basés sur les données : cartographier la distribution spatiale des vecteurs..... 87

Yi Moua, Emmanuel Roux

| | |
|--|----|
| Les modèles de distribution d'espèces | 87 |
| Le modèle Maxent..... | 89 |
| Biais d'échantillonnage et minimisation de leurs impacts sur la modélisation | 89 |
| Application au principal vecteur du paludisme en Guyane française..... | 90 |
| Conclusion | 95 |
| Références | 97 |

Chapitre 7. Modèles fondés sur les connaissances : exemple d'un outil d'évaluation multicritère pour la santé publique..... 99

Fanjaso Rakotomanana, Hobiniaina Anthonio Rakotoarison

| | |
|---|-----|
| L'approche multicritère spatialisée, une approche fondée sur les connaissances | 100 |
| Exemple d'application sur le risque de paludisme dans les Hautes Terres centrales de Madagascar | 102 |
| Conclusion | 107 |
| Références | 107 |

Chapitre 8. Arbocarto : un modèle mécaniste fondé sur le cycle de vie des moustiques *Aedes* 109

Renaud Marti, Marie Demarchi, Mathieu Castets, Annelise Tran

| | |
|---|-----|
| Un modèle générique construit sur le cycle de vie du moustique..... | 110 |
| Adaptation du modèle aux espèces <i>Aedes albopictus</i> et <i>Aedes aegypti</i> et spatialisation..... | 112 |

| | |
|---|------------|
| Implémentation, initialisation et simulation des abondances de moustiques <i>Aedes</i> | 113 |
| Arbocarto : une interface adaptée aux actions de la lutte antivectorielle..... | 116 |
| Références | 118 |
| Chapitre 9. Simulation spatiale du risque de propagation de la dengue à partir de modèles comportementaux vecteurs et hôtes..... | 119 |
| <i>Éric Daudé, Sébastien Rey-Coyrehourcq, Alexandre Cebeillac</i> | |
| Modèles individus-centrés et spatialisés..... | 120 |
| Application à la dengue à Bangkok : MO ³ , méthodes et données..... | 122 |
| Simulations du modèle MO ³ | 127 |
| Conclusion | 129 |
| Références | 130 |
| Conclusion générale et perspectives | 131 |
| <i>Thierry Baldet, Hélène Guis</i> | |
| Références | 135 |
| Remerciements..... | 137 |
| Glossaire | 139 |
| Liste des sigles | 141 |
| Les auteurs | 145 |

Préface

Moustiques. Un mot générique bien pratique pour simplifier une grande diversité biologique, écologique, sanitaire, sociale, économique et historique. Les moustiques, *Culicidae* de leur nom scientifique, regroupent les 3600 espèces décrites sur terre, plus toutes celles non encore décrites. Si la nature a horreur du vide, les moustiques aussi. On les trouve sur tous les continents, dans tous les écosystèmes, et ce, depuis bien plus longtemps que les humains.

Mais, lecteur humain, tu n'en as pas conscience. Seul te préoccupe le moustique qui empêche de dormir, de profiter de la soirée en plein air et, selon le lieu où tu vis, le moustique responsable de maladies dans ta famille ou chez tes animaux domestiques.

Émergence. Ce mot est devenu à la mode ces dernières années. Les humains ont pris conscience que des maladies pouvaient émerger. Charles Nicolle dans *Destin des maladies infectieuses* écrivait déjà en 1933 : « il y aura des maladies [infectieuses] nouvelles. C'est un fait fatal ». Certaines de ces maladies, qui émergent de foyers sauvages, à l'issue de changements environnementaux, climatiques, démographiques, sociétaux, culturels, sanitaires, économiques, etc. sont à transmission vectorielle, et parfois les moustiques en sont les responsables en inoculant virus et parasites.

Les moustiques sont des insectes, mais leur étude et leur contrôle vont bien au-delà de l'entomologie (*entoma*, l'insecte en grec ancien). De nombreuses disciplines complémentaires sont mobilisées, de la taxonomie à la santé publique. La télédétection et la modélisation spatiale en font partie et sont maintenant des composantes indispensables de l'entomologie médicale et vétérinaire, mais aussi agricole.

Hippocrate, philosophe et médecin grec, fait déjà, au v^e siècle avant notre ère, le lien entre environnement et maladies. Il décrit des fièvres ayant la symptomatologie du paludisme et observe une association entre les marais et ces fièvres dans son traité *Des airs, des eaux et des lieux*. Évidemment, à l'époque, si on se plaignait probablement des moustiques, le lien de causalité avec le paludisme était impossible à faire. Plus proche de nous, sur l'actuel territoire hexagonal, la Vendée, la Sologne, les Dombes, la Camargue étaient envahies de moustiques et les fièvres y étaient fréquentes jusqu'au début du xx^e siècle. La construction du château de Versailles, avant canalisation des eaux de surfaces, a été le théâtre de nombreux décès probablement dus au paludisme.

C'est seulement à l'aire pastorienne, donc très récemment, que les liens de causalité entre milieux, climat, moustiques, microbes et maladies ont été précisés. Depuis 20 ans nous sommes maintenant capables d'aller beaucoup plus loin dans la compréhension de ces associations, grâce aux nouvelles techniques de génomique, mais aussi grâce à la télédétection, à l'analyse spatiale des phénomènes biologiques, moustiques compris, et à la modélisation des risques sanitaires.

La diversité biologique des moustiques est extraordinaire. Les 3 600 espèces sont particulièrement bien adaptées à des milieux et biotopes spécifiques. Certaines espèces ne se trouvent, à l'état larvaire, que dans des gîtes très particuliers, comme des phytotelmes arborés ou des urnes de plantes carnivores comme les népenthès. D'autres sont moins exigeantes et se développent dans des lacs, des marécages, des bords de rivières ; d'autres enfin se trouvent presque uniquement dans des collections d'eau artificielles créées par les humains. Certaines espèces ne sont connues que dans une seule zone (*Aedes pia* à Mayotte) et d'autres, profitant de l'environnement urbain, se retrouvent sur tous les continents (*Aedes albopictus*). Certaines se nourrissent du sang de nombreux animaux, dont l'humain (*Anopheles arabiensis*), alors que d'autres ont des régimes alimentaires très stricts (miellat de fourmis pour *Malaya* sp.). Plusieurs espèces sont capables de passer la saison sèche ou froide sous forme d'œufs en diapause (*Aedes*) ou sous forme adulte au repos dans des abris, dont les maisons ou les étables. Mais tous ont besoin d'eau pour pondre leurs œufs et permettre le développement des larves et des nymphes. L'eau, par sa présence, sa qualité, ses caractères physico-chimiques et biotiques (plantes, nourriture, prédateurs), est donc un paramètre essentiel de la biologie des moustiques. Toute approche visant à décrire, analyser et corrélérer les paramètres liés à l'eau (pluviométrie, aménagements, végétation, etc.) permet de mieux estimer, voire prédire, la présence et l'abondance des différentes espèces et populations de moustiques, et les risques afférents.

Ces risques ne sont pas anodins. L'histoire est riche de destins contrariés par les moustiques, de la mort d'Alexandre le Grand attribuée au paludisme (*Anopheles*) ou à la fièvre West Nile (*Culex*), au creusement du canal de Panama freiné par le paludisme et la fièvre jaune (*Aedes*), jusqu'à l'abandon récent, par leurs habitants, d'immeubles végétalisés envahis de moustiques-tigres en Chine. La liste des agents infectieux transmis aux humains et aux animaux par les différentes espèces de moustiques est impressionnante. Près de 100 maladies humaines sont attribuables aux moustiques. Certaines sont encore rares, comme la fièvre de Mayaro en Amérique du Sud. D'autres sont trop fréquentes comme le paludisme, qui tue près de 400 000 enfants par an en Afrique, ou la dengue, qui touche, d'après l'OMS, plus de 300 millions de personnes par an sur tous les continents.

Les enjeux sanitaires, sociaux et économiques liés aux moustiques sont donc colossaux, mais les enjeux écologiques le sont également. Si les moustiques ont bien leur place dans les chaînes trophiques et sont une composante de la biodiversité, il n'en reste pas moins que le contrôle des quelques espèces responsables de grandes maladies humaines (et animales) est nécessaire. Ce contrôle doit être rationalisé, intégré, ajusté, durable, accepté et le moins impactant possible sur l'environnement. L'ère de l'usage intensif d'insecticides se termine. D'autres méthodes plus ciblées, y compris géographiquement, sont en développement. Les approches de téledétection, d'analyse spatiale et de modélisation sont devenues indispensables, bien qu'encore insuffisamment utilisées dans l'aide à la décision pour atteindre ces objectifs.

Les exemples pris dans cet ouvrage — *Anopheles* et risques de paludisme en Camargue, en Guyane française, en Asie ou à Madagascar ; *Aedes* et risques de dengue en Thaïlande, au Brésil ou dans l'océan Indien — démontrent que la téledétection et la modélisation spatiale, appliquées aux moustiques et aux maladies dont ils peuvent être responsables, sont indispensables. Ils démontrent également que l'interdisciplinarité

est nécessaire. Des modèles bâtis sur des données biologiques mal documentées, non seulement sont sans intérêt, mais peuvent donner de faux espoirs à ceux qui les utiliseront. Inversement, un travail d'échantillonnage de terrain rigoureux restera mal exploité sans une bonne modélisation spatiale.

Chaque communauté scientifique a ses concepts et son langage. Se tromper de symposium spécialisé peut devenir un calvaire si on n'en maîtrise pas les codes. Lâchez un entomologiste dans un congrès sur la télédétection, ou un géomaticien au meeting annuel de la Société d'écologie des vecteurs, il n'est pas certain que les mots ou acronymes comme réflectance, fauchée, exophile, sternite, univoltin, mode raster, diapause, signature spectrale, gonotrophique, MODIS, NDVI et autre NDWI, soient perçus comme ils le méritent. Seul le mot vecteur sera peut-être compris par tous, mais avec deux sens bien différents : biologique et géomatique. Le mérite de ce livre écrit par des spécialistes ayant pu se confronter, voire appartenant, aux deux communautés est de rendre accessibles ces concepts à l'aide d'exemples concrets bien documentés. Merci et félicitations aux auteurs. Cet ouvrage sera une référence très utile pour tous ceux qui, conscients de la nécessité d'une approche globale, spatiale et environnementale, pour étudier les moustiques (et au-delà les autres vecteurs) et documenter leur biologie, leurs distributions, leurs impacts et leur contrôle, sont à la recherche d'exemples pour comprendre et utiliser la télédétection et la modélisation spatiale.

Ce livre est un pont entre les communautés invitant les entomologistes à « prendre de la hauteur », et les télédéTECTEURS et géomaticiens à découvrir le monde fascinant des moustiques.

Didier Fontenille
Entomologiste médical, directeur de recherche
IRD, UMR MIVEGEC (université de Montpellier, IRD, CNRS)

Introduction générale

THIBAUT CATRY, ÉRIC DAUDÉ, NADINE DESSAY, ANNELISE TRAN

La télédétection fournit des données d'observation de la Terre qui peuvent être particulièrement utiles pour la cartographie et la modélisation en santé. Pour l'Organisation mondiale de la santé (OMS), l'identification, le suivi et le contrôle des populations d'arthropodes vecteurs constituent la priorité en matière de surveillance des maladies à transmission vectorielle. À ce titre, depuis plus de deux décennies, de nombreux travaux ont montré que les images satellite, et plus généralement les données spatialisées, permettent l'identification des variables environnementales et climatiques qui influencent les dynamiques spatio-temporelles des maladies vectorielles, et notamment celles dont l'agent pathogène est transmis par des moustiques. La diversité actuelle des capteurs satellite permet d'accéder à des données à une résolution spatiale et temporelle suffisamment élevée pour (i) caractériser différentes variables environnementales et climatiques (occupation du sol, précipitations, température, humidité, etc.) associées à la présence d'habitats favorables, à l'occurrence et à l'abondance des vecteurs, (ii) développer des méthodes et outils de prévision des risques associés à ces vecteurs et aux agents pathogènes qu'ils transmettent, et ce, à différentes échelles et (iii) contribuer à la surveillance de l'évolution de ce risque. Ces travaux reposent sur des méthodes avancées de traitement d'images satellite (classifications pixel ou objet, utilisation de séries temporelles, algorithmes d'intelligence artificielle, voir partie 1) multicapteurs (optique, radar, lidar, etc.) et multirésolutions (moyenne, haute, très haute résolution spatiale), ainsi que sur l'intégration de ces variables issues de la télédétection couplées à d'autres types d'information spatiale dans des approches de modélisation (basées sur les connaissances, les données, les processus ou les comportements, voir partie 2). Ces modèles permettent la prise en compte d'un grand nombre de variables (notamment environnementales et climatiques) dans des systèmes complexes dynamiques et améliorent la compréhension de l'épidémiologie des maladies vectorielles dues aux moustiques et des mécanismes de leur transmission, qui représentent un enjeu majeur de santé publique.

Issues de ces travaux développés dans le cadre de programmes de recherche, des méthodes opérationnelles reposant sur la télédétection et la modélisation se sont multipliées ces dernières années dans le domaine de la santé. Des produits (cartes de risque, chaînes de traitement) ont ainsi pu être mis à disposition par des infrastructures comme le pôle de données et de services surfaces continentales Theia¹ et en particulier

1. <https://www.theia-land.fr/>

par son centre d'expertise scientifique (CES) «Risques maladies infectieuses»². De telles initiatives ont permis de fédérer des communautés de chercheurs, venus de la géomatique et d'autres disciplines comme l'entomologie et l'épidémiologie, ainsi que des acteurs de la santé publique autour de l'objectif commun d'améliorer les connaissances et les outils de lutte contre les maladies vectorielles dues aux moustiques. En particulier, le projet Anisette³ (Analyse inter-site : évaluation de la téledétection comme outil prédictif pour la surveillance et le contrôle de maladies causées par des moustiques), financé par le Centre national d'études spatiales (Cnes) entre 2018 et 2022, a eu pour objectif de mesurer l'interopérabilité de méthodes couplant téledétection et modélisation spatiale pour prédire la dynamique des moustiques vecteurs et des maladies associées. Il s'appuie sur les résultats de différents projets de recherche, clôturés ou en cours, menés par des équipes issues de différentes unités mixtes de recherche (ASTRE, Espace-Dev, IDEES et TETIS) qui abordent la modélisation entomologique en étroite collaboration avec d'autres organismes comme le réseau des instituts Pasteur, et en particulier l'Institut Pasteur de Madagascar. L'interopérabilité des méthodes développées dans le cadre de ces projets a été testée sur plusieurs sites en Amérique du Sud (Brésil, Antilles, Guyane), en Europe (France), dans l'océan Indien (Madagascar, Maurice, La Réunion), en Asie du Sud et du Sud-Est (Inde, Thaïlande, Cambodge) et en Océanie (Nouvelle-Calédonie).

Le présent ouvrage est le fruit des travaux et réflexions menés dans le cadre du projet Anisette, et présente de manière synthétique les concepts théoriques, les approches méthodologiques, les outils et les principaux résultats obtenus par l'équipe du projet, composée principalement de géographes, géomaticiens et modélisateurs. Avec pour objectif d'introduire les concepts de téledétection et de modélisation spatiale appliquées à l'étude des maladies impliquant des moustiques vecteurs, il s'adresse à un public non expert souhaitant s'initier à ces notions et à leurs applications en santé publique⁴. L'ouvrage s'organise en deux parties distinctes : la première partie aborde les méthodes de téledétection pour l'identification et la caractérisation des déterminants environnementaux et climatiques des populations de moustiques vecteurs. La seconde partie se focalise sur l'intégration de ces variables dans différentes approches de modélisation pour la mise en place d'outils opérationnels de surveillance des maladies vectorielles dont sont responsables certaines espèces de moustiques. Afin de faciliter la lecture, plusieurs termes techniques — liés aux différents domaines concernés : entomologie, épidémiologie, téledétection, géomatique, mathématiques — sont définis au fil du texte et regroupés dans un glossaire final. Une liste des sigles utilisés et de leurs déclinaisons est aussi proposée en fin d'ouvrage.

►► Notions de téledétection

La téledétection est définie comme l'ensemble des techniques utilisées pour collecter des informations sur des objets à distance; en particulier, l'observation de la Terre utilise un instrument (le capteur), embarqué à bord d'une plateforme (satellite, avion,

2. <https://www.theia-land.fr/ceslist/ces-risques-maladies-infectieuses/>

3. <https://anisette.cirad.fr/>

4. Pour des informations plus complètes sur la biologie et l'écologie des moustiques vecteurs, le lecteur pourra se référer à l'ouvrage *Le moustique, ennemi public n° 1 ?*, coordonné par S. Lecollinet, D. Fontenille, N. Pagès et A.-B. Failloux, et récemment publié aux Éditions Quæ.

drone, etc.), pour caractériser la surface de la Terre (les surfaces continentales, les océans ou l'atmosphère). Les exemples typiques de télédétection incluent l'utilisation de l'imagerie satellitaire ou de la photographie aérienne.

Principales caractéristiques des capteurs de télédétection

Il existe différents types de capteurs en télédétection. Les capteurs passifs mesurent le rayonnement naturel émis ou réfléchi par la surface observée, ce sont par exemple les capteurs optiques, qui dépendent d'une source d'énergie externe : la lumière du soleil. Les capteurs actifs mesurent, eux, la réflexion du rayonnement qu'ils émettent, c'est le cas des radars, qui émettent leur propre source d'énergie, et mesurent la rugosité et l'humidité des surfaces.

Les signaux mesurés par les capteurs de télédétection sont appelés « rayonnement électromagnétique » et possèdent des propriétés que l'on peut mesurer et qui servent à les décrire : la longueur d'onde (représentant la périodicité spatiale des oscillations, c'est-à-dire la distance entre deux maxima de l'oscillation), l'amplitude (ou intensité, correspondant à la valeur maximale de l'oscillation) et la polarisation (relation entre l'amplitude et la direction de propagation de l'onde). Les capteurs mesurent la quantité d'énergie transportée par le rayonnement électromagnétique émis ou réfléchi par les surfaces et, en particulier, l'albédo ou réflectance hémisphérique directionnelle, défini comme le rapport entre l'énergie réfléchie et l'énergie reçue. Les images panchromatiques, en noir et blanc, sont obtenues à partir de l'enregistrement de ce rayonnement dans un unique intervalle de longueur d'onde. Lorsque cette mesure s'effectue dans différentes longueurs d'onde, on parle de mesure « multispectrale ». Les capteurs de télédétection peuvent mesurer des signaux dans le spectre du visible (télédétection optique), de l'infrarouge ou des micro-ondes (télédétection radar), apportant ainsi des informations complémentaires. Les capteurs peuvent être situés au sol, sur des avions ou des drones (on parle de capteurs aéroportés) ou sur des satellites. La plupart des capteurs d'observation de la Terre organisent l'information acquise sous forme d'images numériques, caractérisées par la taille de pixel et la largeur de la prise de vue (la *fauchée*).

Les capteurs de télédétection sont principalement caractérisés par trois résolutions :

- la résolution spatiale est la taille minimale des objets observables, étroitement liée à la taille élémentaire de chaque pixel de l'image. On parle de basse résolution pour des images dont la résolution spatiale est supérieure à 1 km, de moyenne résolution quand elle est comprise entre 100 m et 1 km, de haute résolution entre 10 et 100 m et de très haute résolution pour des valeurs métriques ;
- la résolution temporelle qui correspond au temps de revisite d'un satellite à un endroit donné, c'est-à-dire l'intervalle de temps entre deux prises de vue identiques ;
- la résolution spectrale qui caractérise la capacité d'un capteur à distinguer des signaux de longueurs d'onde différentes.

La notion de signature spectrale

Chaque type de surface est caractérisé par sa signature spectrale, définie comme la variation de la réflectance en fonction de la longueur d'onde (figure I.1). La signature spectrale dépend de la nature de la surface, de ses propriétés physiques et de l'interaction qu'elle produit avec l'onde électromagnétique qu'elle reçoit.

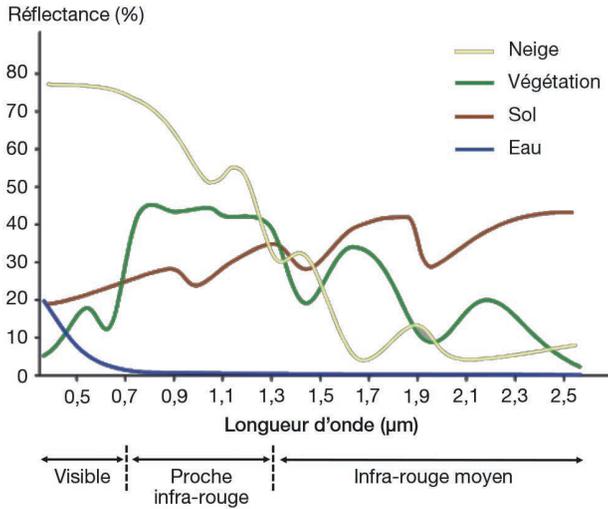


Figure I.1. Les signatures spectrales des surfaces naturelles dans différentes gammes de longueurs d'onde. Adapté de <https://e-cours.univ-paris1.fr/>.

Extraction de l'information des images satellite

Il existe différentes façons d'exploiter les informations spectrales contenues dans les images satellites. La méthode la plus simple consiste en une interprétation visuelle de l'image ou photo-interprétation. Des méthodes d'analyse plus complexes sont utilisées pour réaliser des classifications du contenu spectral des images, en se basant sur l'information contenue dans les pixels (approches orientées pixels) ou dans des objets qui sont des regroupements de pixels en régions homogènes (approches orientées objet). Ces approches de classification peuvent être non supervisées (sans connaissance *a priori* sur l'image à classer) ou supervisées (quand des connaissances *a priori* sont disponibles) [figure I.2]. Les algorithmes de classifications (*K-means*,

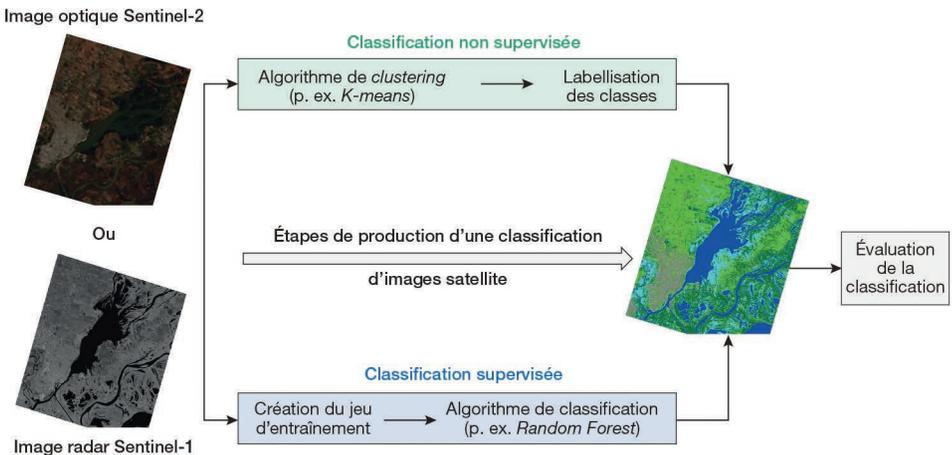


Figure I.2. Principes généraux des approches de classification supervisée et non supervisée d'images satellite optiques et radar.

Random Forest, Support-Vector Machine, etc.) traduisent l'information contenue dans chaque pixel ou objet en une classe thématique qui décrit l'image étudiée.

Diffusion des images satellite

Il existe actuellement une très grande diversité de portails qui mettent à disposition des images satellite optiques et radar. C'est le cas pour les capteurs Sentinel-1 et 2 de l'Agence spatiale européenne dans le cadre du programme Copernicus⁵.

On trouve également un large éventail de logiciels, outils et algorithmes de traitement des images satellite qui sont libres et qui participent à la vulgarisation de cette technologie. Les informations extraites des images de télédétection peuvent par la suite être combinées et analysées avec d'autres données spatialisées à l'aide d'un système d'information géographique (SIG).

► Introduction aux systèmes d'information géographique

Les systèmes d'information géographique (SIG) sont des outils informatiques permettant l'acquisition, le stockage, la mise à jour, l'intégration, l'analyse, la visualisation et la restitution de données numériques géoréférencées (c'est-à-dire que l'on peut localiser dans l'espace par leurs coordonnées géographiques). Ils permettent de manipuler et de traiter des données spatialisées de natures et de sources différentes.

L'organisation des données géoréférencées (ou à référence spatiale) dans un SIG repose sur le principe suivant : chaque type d'objet (la végétation, les cours d'eau, les villes ou les résultats de piégeage des moustiques) est représenté par une couche d'information différente (figure I.3). La superposition de ces couches par correspondance spatiale permet de visualiser et d'analyser chaque couche d'information séparément (requête horizontale telle que : Quelles sont les espèces de moustiques observées et en quelles

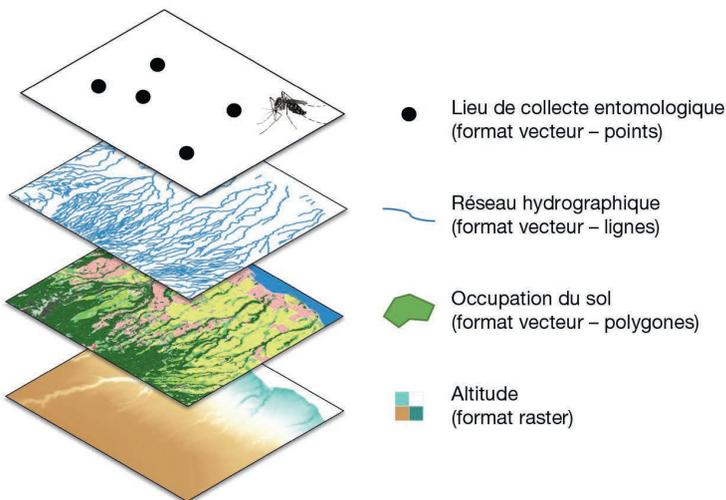


Figure I.3. Principe d'organisation d'un système d'information géographique – couches d'information thématiques et modes de représentation.

5. <https://www.copernicus.eu/fr/propos-de-copernicus/infrastructure/decouvrez-nos-satellites>

abondances?) et les relations entre des couches d'information différentes (requête verticale telle que : Dans quel type d'occupation du sol observe-t-on les abondances de moustiques les plus élevées?).

Dans une même couche d'information spatiale, les objets sont de même nature et représentés selon deux modes possibles :

- le mode vectoriel ou « vecteur » : dans ce mode, chaque objet est représenté sous forme de polygones (p. ex. une parcelle de végétation), de lignes (p. ex. une route ou une rivière) ou de points (p. ex. localisation d'un site de piégeage) [figure I.3]. Le format de fichier vecteur le plus répandu est le format « .shp » (shapefile);
- le mode matriciel ou « raster » : dans ce mode, l'information spatiale est représentée sous forme d'une image (ou grille) composée de cellules de même taille appelées pixels (comme sur une image satellite). Le format de fichier raster le plus répandu est le format « .tif ».

Dans les deux cas, l'information géographique est couplée avec une information thématique renseignant sur les propriétés de l'objet. En mode vecteur, cette information thématique est stockée dans une table attributaire associée (par exemple, pour les résultats d'un piégeage entomologique, représenté sous forme de point, la table associée listera : date du relevé, espèces capturées, abondances, etc.). En mode raster, la valeur du pixel contient l'information représentée (pour une image satellite multi-spectrale, la valeur des pixels sera la valeur de réflectance mesurée par le capteur).

Partie 1

Informations spatiales pour la surveillance des moustiques vecteurs et des maladies associées

La première partie de cet ouvrage s'intéresse à l'identification des différentes variables environnementales, climatiques et démographiques qui influencent la présence et la dynamique des populations de moustiques, avec un focus particulier sur les images satellite et leur apport pour la thématique des maladies à transmission vectorielle.

Le premier chapitre de cette partie recense ces différentes variables ainsi que les données et méthodes de télédétection satellite qui permettent d'y avoir accès. Les chapitres suivants présentent quant à eux différentes approches reposant sur l'imagerie satellite pour l'extraction de ces variables : l'utilisation d'indices spectraux pour l'eau et la végétation (chapitre 2), l'étude des températures de l'air (chapitre 3), la caractérisation des populations humaines (chapitre 4) et enfin l'apport des approches basées sur la texture dans les images pour la caractérisation de l'environnement urbain (chapitre 5).

