Update Sciences & technologies

TÉLÉDÉTECTION ET MODÉLISATION SPATIALE

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

Annelise Tran, Éric Daudé, Thibault Catry, coord.

éditions Quæ

Conclusion générale et perspectives

Thierry Baldet, Hélène Guis

Les maladies vectorielles dont sont responsables les moustiques, comme le paludisme, constituent toujours un fardeau pour les systèmes de santé et le développement de nombreux pays tropicaux, notamment en Afrique subsaharienne. En outre, ces dernières décennies, de nombreuses maladies vectorielles dues aux moustiques, comme la dengue, le chikungunya, le virus Zika, la fièvre du Nil occidental et la fièvre de la vallée du Rift ont émergé ou réémergé de par le monde, gagnant de nouveaux territoires et affectant aussi bien la santé animale que la santé humaine. La persistance ou l'émergence de ces maladies vectorielles est conditionnée par de nombreux facteurs climatiques, environnementaux, démographiques, propres à chaque territoire, influençant à différentes échelles leur fonctionnement. Depuis deux décennies, les approches géomatiques sont utilisées pour mieux comprendre les processus épidémiologiques des maladies vectorielles et mieux prédire leurs évolutions dans un monde en plein bouleversement.

Cet ouvrage dresse un panorama original et actualisé des applications potentielles de télédétection et de modélisation spatiale pour mieux surveiller et contrôler les maladies infectieuses dont l'agent pathogène est transmis par des moustiques. La présence, l'abondance et le comportement des moustiques vecteurs et, de fait, l'épidémiologie des maladies qu'ils transmettent sont des phénomènes complexes dépendant de différents facteurs géographiques, climatiques et environnementaux, y compris de facteurs liés à la démographie et aux activités humaines, qui conditionnent localement l'expression de ces maladies dans l'espace et le temps.

Les techniques de télédétection et de SIG couplées à différentes approches de modélisation appliquées aux maladies vectorielles présentent de multiples atouts :
– cartographier la distribution des gîtes larvaires et les densités de populations de moustiques adultes ;
– évaluer à différentes échelles spatiales le risque vectoriel, pour des maladies déjà présentes ou risquant d'être introduites dans un territoire ;
– déterminer des lieux et des saisons à haut risque de transmission (*hot spots*) afin d'optimiser la surveillance et le contrôle ;
– déterminer les facteurs environnementaux, démographiques et socioculturels qui exposent davantage certaines communautés aux risques d'infection afin de cibler la prévention ;

– prendre en compte les changements humains et les modifications environnementales induites, notamment les transformations des terres agricoles et de la couverture végétale, l'étalement urbain et l'industrialisation, afin de prévoir à court et moyen termes l'évolution du risque vectoriel ;
– évaluer l'efficacité et aider à optimiser différentes méthodes de lutte antivectorielle, prises isolément ou en combinaison dans le cadre d'une stratégie de lutte intégrée.

Les informations dérivées des données satellites utiles pour mieux appréhender le risque vectoriel et décrites ici dans la partie 1 sont disponibles facilement et à moindre coût pour les chercheurs et les gestionnaires de la santé. Ces informations sont intégrées avec d'autres données climatiques, entomologiques, démographiques et épidémiologiques dans des plateformes SIG permettant d'appréhender le fonctionnement complexe d'une maladie vectorielle tenant compte de tous ses déterminants et de leur dimension spatiale.

Différentes approches de modélisation présentées dans la partie 2 de cet ouvrage sont alors utilisées pour mieux comprendre le fonctionnement d'une maladie vectorielle dans un contexte donné et mieux prédire son évolution dans l'espace et le temps, tenant compte des interventions de lutte antivectorielle ou des changements environnementaux et climatiques. Ces approches diffèrent selon les objectifs, les connaissances et les informations disponibles sur un vecteur et une maladie vectorielle donnée. La partie 2 présente ainsi ces approches diverses mais souvent complémentaires (modèles de distribution d'espèces, modèles basés sur les connaissances, modèles mécanistes, modèles comportementaux) déployées sur des maladies vectorielles variées (couples *Anopheles*/paludisme, *Aedes*/dengue) dans des contextes différents (Guyane, Madagascar, La Réunion, Thaïlande) et permettant de développer des outils opérationnels utiles aux décideurs et aux gestionnaires de santé pour optimiser la surveillance entomologique et la lutte antivectorielle.

À l'échelle d'un territoire insulaire tropical soumis à différents risques vectoriels comme l'île de La Réunion, des réussites récentes illustrent tout le potentiel de ces approches de modélisation appliquées comme une boîte à outils. La caractérisation spatiale et saisonnière du risque lié au typhus murin ou aux « bavites »[1] permet de mettre en place des campagnes de sensibilisation ciblées et adaptées auprès des professionnels de santé ou des éleveurs (Grimaud *et al.*, 2021, 2019 ; Tran *et al.*, 2021). Des outils cartographiques de prédiction des densités vectorielles et du risque de transmission de la dengue sont appropriés et utilisés depuis plusieurs années par l'opérateur de lutte antivectorielle (ARS La Réunion) pour optimiser la surveillance entomologique et les actions de prévention et de contrôle (Tran *et al.*, 2020). Des outils de modélisation sont développés et transférés pour évaluer et optimiser les méthodes de lutte antivectorielle seule ou en combinaison dans un contexte de stratégie de lutte intégrée (Douchet *et al.*, 2021). Ces réussites sont favorisées à La Réunion par la disponibilité et la richesse des connaissances et données expérimentales et observationnelles ainsi que la proximité locale de chercheurs issus de différentes disciplines et travaillant étroitement avec les bénéficiaires de ces travaux de recherche comme l'ARS La Réunion au sein d'un réseau comme le Dispositif de recherche et d'enseignement en partenariat

1. La fièvre catarrhale ovine et la maladie hémorragique épizootique des cervidés sont deux maladies animales virales touchant régulièrement l'île de La Réunion. Ces « bavites », surnom local tiré des symptômes de salivation excessive qu'elles induisent, sont responsables de pertes économiques importantes.

One Health Océan Indien[2]. La flexibilité et l'adaptabilité de ces approches permettent néanmoins de travailler dans d'autres contextes moins documentés comme cela est montré dans cet ouvrage à travers les travaux menés dans la grande île voisine de Madagascar (Rakotoarison *et al.*, 2020).

Comme nous l'avons vu avec l'exemple de l'île de La Réunion, la convergence de facteurs tels que la disponibilité de données satellites multi-temporelles et de données entomologiques et épidémiologiques géoréférencées, la collaboration entre les scientifiques de la télédétection, les modélisateurs et les biologistes, et la disponibilité de systèmes statistiques et d'algorithmes de traitement d'images adaptés créent un environnement de recherche fertile. L'association des bénéficiaires en amont des travaux de recherche et une politique réelle de transfert des résultats issus de ces travaux à travers la coconstruction d'outils opérationnels de gestion facilitent leur appropriation et leur utilisation effective dans les programmes de surveillance et de lutte antivectorielle. Ces approches de télédétection et de modélisation spatiale relativement génériques et transversales se déclinent aussi bien sur des maladies vectorielles zoonotiques (fièvre de la vallée du Rift, fièvre du Nil occidental, typhus murin), humaines (paludisme, dengue) qu'animales (« bavites ») et associent naturellement les sciences environnementales et humaines. On retrouve ici les piliers de l'approche « une seule santé »[3], y compris la multidisciplinarité et l'intersectorialité.

Le développement de la géomatique appliquée aux maladies vectorielles a connu un engouement certain ces dernières décennies. Un large choix de puissants logiciels de traitement d'images, de SIG, d'outils statistiques et d'approches de modélisation, comme illustré dans cet ouvrage, est désormais disponible dans un environnement informatique de bureau abordable, ce qui permet aux épidémiologistes et aux biologistes d'expérimenter de nouvelles techniques d'analyse spatiale. Bien que les études examinées dans ce document démontrent l'efficacité de la télédétection et d'autres technologies géospatiales dans la surveillance et le contrôle des maladies vectorielles, plusieurs paramètres doivent être pris en compte pour que ces technologies soient adoptées de façon routinière dans la gestion de la santé publique, notamment dans les pays du Sud. Il s'agit entre autres de la disponibilité des ressources pour la collecte, le traitement et la modélisation des données géospatiales, de la formation du personnel à l'acquisition et l'interprétation correcte des résultats, de la rentabilité de ces techniques de surveillance et de la disponibilité continue des données de télédétection en temps opportun. Il convient également de souligner que l'affectation de ressources à ces nouvelles techniques de surveillance ne doit pas se faire au détriment des activités de base de prévention et de gestion des maladies au niveau communautaire.

Pour renforcer les capacités dans le domaine de la géomatique appliquée aux maladies vectorielles et construire des collaborations interdisciplinaires et intersectorielles, il convient de souligner l'importance des formations : les formations diplômantes (masters, thèses) de jeunes étudiants permettent de développer la masse critique des compétences sur ces thématiques, notamment dans les pays du Sud. L'intégration de modules spécifiques à l'utilisation de ces approches dans la formation initiale des futurs

2. https://www.onehealth-oi.org/
3. L'initiative *One Health* (une seule santé) est portée par l'OMS, l'Organisation mondiale de la santé animale (OMSA), l'Organisation des Nations unies pour l'agriculture et l'alimentation (FAO) et le Programme des Nations unies pour l'environnement (PNUE).

acteurs/décideurs de santé et l'organisation de formations professionnelles permettent de partager l'avancée des travaux de recherche sur l'apport des données d'observation de la Terre et des modèles dans les domaines de la santé humaine, de la santé animale et des écosystèmes, en soulignant leurs potentiels et leurs limites. Le développement récent des formations en ligne tend à favoriser cette appropriation par les utilisateurs des produits et méthodes de télédétection et de modélisation.

Les perspectives de l'utilisation de l'information spatiale, et en particulier des images d'observation de la Terre, pour mieux comprendre, prédire et prévenir les risques de transmission de maladies vectorielles, sont nombreuses. Tout d'abord, et malgré leur développement exponentiel, l'application de ces techniques de télédétection et de modélisation spatiale reste à faire pour beaucoup de maladies vectorielles dans de nombreux territoires. L'exactitude des cartes prédictives de ces maladies doit aussi être vérifiée sur le terrain : on aura toujours besoin de spécialistes en entomologie et en épidémiologie. Outre les approches biologiques, les modèles sociaux et comportementaux tels que le temps passé par les individus à l'extérieur — qui augmente le risque d'exposition aux vecteurs anthropophiles —, les types de construction des maisons, l'utilisation de moustiquaires et autres répulsifs, ainsi que la disponibilité d'installations sanitaires de base et de soins de santé primaires — qui sont liés aux conditions socio-économiques —, sont importants pour la prévention et le contrôle des maladies vectorielles. Ainsi, il a été démontré que les caractéristiques de ces maladies sont étroitement liées à la pauvreté et aux inégalités sociales. Ces facteurs socio-anthropologiques et entomologiques ne peuvent être déduits des seules techniques de télédétection.

Une des pistes intéressantes qu'ouvre la modélisation est la possibilité de tester des scénarios futurs de changements et d'étudier leurs potentiels impacts sur les risques sanitaires. Par exemple, l'impact des changements climatiques sur la distribution et l'abondance des populations de vecteurs, ainsi que sur le risque de transmission d'agents pathogènes, peut être étudié par la modélisation (Guis *et al.*, 2012 ; Kraemer *et al.*, 2019). En effet, la plupart des modèles présentés dans la partie 2 intègrent les variables température et précipitations : utiliser comme entrée de ces modèles les projections de ces deux variables (augmentation des températures, modification des régimes de pluies) selon les scénarios du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) permet de tester *in silico* leurs effets. D'autre part, l'impact d'actions de lutte contre les vecteurs peut également être testé par les modèles (Douchet *et al.*, 2021 ; Haramboure *et al.*, 2020) et discuté avec les acteurs de la LAV pour optimiser leurs actions, notamment dans le cadre de la mise en place de stratégies de lutte intégrée. C'est d'ailleurs un des principaux besoins d'évolutions exprimés par les utilisateurs de l'outil Arbocarto que sont les opérateurs de la lutte antivectorielle en France (cf. chapitre 8). Enfin, d'autres types de scénarios peuvent être testés, comme l'impact des changements démographiques (populations, mobilités), mais aussi des changements environnementaux. Dans ce dernier exemple, l'intérêt de la modélisation est de permettre aux décideurs la visualisation sous forme de cartes de l'impact des mesures d'aménagement ou d'atténuation, afin d'éclairer la prise de décision en intégrant des enjeux de santé et notamment la prévention des risques épidémiques.

Enfin, si les données spatiales et les méthodes présentées dans cet ouvrage portent sur les maladies dont sont responsables les moustiques, les approches présentées (extraction d'informations à partir de l'imagerie satellite, modélisation de distribution

d'espèces, de dynamiques de population, de mobilités) ont un caractère générique. Elles peuvent donc être adaptées à d'autres questions et enjeux, comme les enjeux de biodiversité (et l'étude de leurs liens avec la santé), mais aussi les enjeux de sécurité alimentaire (avec des questions communes liées à l'épidémiologie végétale ainsi qu'à la distribution et à la dynamique des ravageurs de culture). Ces questions rejoignent l'approche « une seule santé » qui, au-delà de la santé animale et humaine, doit également intégrer la santé des plantes et des écosystèmes.

Références

Douchet L., Haramboure M., Baldet T., L'Ambert G., Damiens D., Gouagna L.C., Bouyer J., Labbé P., Tran A., 2021. Comparing sterile male releases and other methods for integrated control of the tiger mosquito in temperate and tropical climates. *Scientific Reports*, 11 (1), 7354.

Grimaud Y., Tran A., Benkimoun S., Boucher F., Esnault O., Cetre-Sossah C., Cardinale E., Garros C., Guis H., 2021. Spatio-temporal modelling of Culicoides Latreille (Diptera: Ceratopogonidae) populations on Reunion Island (Indian Ocean). *Parasit Vectors*, 14 (1), 288.

Grimaud Y., Guis H., Chiroleu F., Boucher F., Tran A., Rakotoarivony I., Duhayon M., Cetre-Sossah C., Esnault O., Cardinale E., Garros C., 2019. Modelling temporal dynamics of Culicoides Latreille (Diptera: Ceratopogonidae) populations on Reunion Island (Indian Ocean), vectors of viruses of veterinary importance. *Parasit Vectors*, 12 (1), 562.

Guis H., Caminade C., Calvete C., Morse A.P., Tran A., Baylis M., 2012. Modelling the effects of past and future climate on the risk of bluetongue emergence in Europe. *Journal of the Royal Society Interface*, 9 (67), 339-350.

Haramboure M., Labbé P., Baldet T., Damiens D., Gouagna L.C., Bouyer J., Tran A., 2020. Modelling the control of *Aedes albopictus* mosquitoes based on sterile males release techniques in a tropical environment. *Ecological Modelling*, 424, 109002.

Kraemer M.U.G., Reiner R.C. Jr., Brady O.J., Messina J.P., Gilbert M., Pigott D.M., Yi D., Johnson K., Earl L., Marczak L.B., Shirude S., Davis Weaver N., Bisanzio D., Perkins T.A., Lai S., Lu X., Jones P., Coelho G.E., Carvalho R.G., Van Bortel W., Marsboom C., Hendrickx G., Schaffner F., Moore C.G., Nax H.H., Bengtsson L., Wetter E., Tatem A.J., Brownstein J.S., Smith D.L., Lambrechts L., Cauchemez S., Linard C., Faria N.R., Pybus O.G., Scott T.W., Liu Q., Yu H., Wint G.R.W., Hay S.I., Golding N., 2019. Past and future spread of the arbovirus vectors *Aedes aegypti* and *Aedes albopictus*. *Nature Microbiology*, 4 (5), 854-863.

Rakotoarison H.A., Rasamimalala M., Rakotondramanga J.M., Ramiranirina B., Franchard T., Kapesa L., Razafindrakoto J., Guis H., Tantely L.M., Girod R., Rakotoniaina S., Baril L., Piola P., Rakotomanana F., 2020. Remote Sensing and Multi-Criteria Evaluation for Malaria Risk Mapping to Support Indoor Residual Spraying Prioritization in the Central Highlands of Madagascar. *Remote Sensing*, 12 (10), 1585.

Tran A., Mangeas M., Demarchi M., Roux E., Degenne P., Haramboure M., Le Goff G., Damiens D., Gouagna L.C., Herbreteau V., Dehecq J.-S., 2020. 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*, 15 (1), e0227407.

Tran A., Le Minter G., Balleydier E., Etheves A., Laval M., Boucher F., Guernier V., Lagadec E., Mavingui P., Cardinale E., Tortosa P., 2021. Describing fine spatiotemporal dynamics of rat fleas in an insular ecosystem enlightens abiotic drivers of murine typhus incidence in humans. *PLOS Neglected Tropical Diseases*, 15 (2), e0009029.