



HAL
open science

Étude par simulation à base d'agents des effets des discontinuités intra-urbaines à Delhi sur la dispersion des moustiques *Aedes aegypti*, vecteurs de la dengue, de la fièvre jaune, du chikungunya et du virus Zika

Somsakun Maneerat, Éric Daudé

► To cite this version:

Somsakun Maneerat, Éric Daudé. Étude par simulation à base d'agents des effets des discontinuités intra-urbaines à Delhi sur la dispersion des moustiques *Aedes aegypti*, vecteurs de la dengue, de la fièvre jaune, du chikungunya et du virus Zika. *Cybergeo : Revue européenne de géographie / European journal of geography*, 2017, 819, 10.4000/cybergeo.28078 . halshs-01529876

HAL Id: halshs-01529876

<https://shs.hal.science/halshs-01529876>

Submitted on 30 May 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Étude par simulation à base d'agents des effets des discontinuités intra-urbaines à Delhi sur la dispersion des moustiques *Aedes aegypti*, vecteurs de la dengue, de la fièvre jaune, du chikungunya et du virus Zika

Agent-based simulation study of the effects of intra-urban discontinuities in Delhi on dispersal of Aedes aegypti mosquitoes, vector of dengue, chikungunya and Zika viruses

运用基于代理的模拟研究埃及伊蚊 (*Aedes aegypti*) , 登革热, 基孔肯雅病毒 (*chikungunya*) 和寨卡 (Zika) 病毒载体的传播的市域内不连续效应, 以德里为例

Somsakun Maneerat et Éric Daudé



Édition électronique

URL : <https://journals.openedition.org/cybergegeo/28078>

DOI : [10.4000/cybergegeo.28078](https://doi.org/10.4000/cybergegeo.28078)

ISSN : 1278-3366

Traduction(s) :

Agent-based simulation study of the intra-urban discontinuity effects in Delhi on dispersal of *Aedes aegypti* mosquitoes, vector of dengue, chikungunya and Zika viruses - URL : <https://journals.openedition.org/cybergegeo/28499> [en]

Éditeur

UMR 8504 Géographie-cités

Ce document vous est offert par Université Le Havre Normandie



Référence électronique

Somsakun Maneerat et Éric Daudé, « Étude par simulation à base d'agents des effets des discontinuités intra-urbaines à Delhi sur la dispersion des moustiques *Aedes aegypti*, vecteurs de la dengue, de la fièvre jaune, du chikungunya et du virus Zika », *Cybergegeo: European Journal of Geography* [En ligne], GeOpenMod - Modèles et logiciels, document 819, mis en ligne le 24 mai 2017, consulté le 30 mai 2022. URL : <http://journals.openedition.org/cybergegeo/28078> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/cybergegeo.28078>

Ce document a été généré automatiquement le 29 septembre 2020.



La revue *Cyberge* est mise à disposition selon les termes de la Licence Creative Commons Attribution 4.0 International.

Étude par simulation à base d'agents des effets des discontinuités intra-urbaines à Delhi sur la dispersion des moustiques *Aedes aegypti*, vecteurs de la dengue, de la fièvre jaune, du chikungunya et du virus Zika

*Agent-based simulation study of the effects of intra-urban discontinuities in Delhi on dispersal of *Aedes aegypti* mosquitoes, vector of dengue, chikungunya and Zika viruses*

运用基于代理的模拟研究埃及伊蚊 (*Aedes aegypti*)，登革热，基孔肯雅病毒 (*chikungunya*) 和寨卡 (Zika) 病毒载体的传播的市域内不连续效应，以德里为例

Somsakun Maneerat et Éric Daudé

Cette recherche a été conduite dans le cadre du projet européen DENFREE : Dengue Research Framework for Resisting Epidemics in Europe (grant agreement : 282 378), European Commission's Seventh Framework Research Programme. Les auteurs remercient Anna-Bella Failloux, Louis Lambrechts et Rick Paul (Institut Pasteur, Paris) pour leurs expertises sur les aspects entomologique du modèle. Les auteurs remercient également les autres partenaires du projet, Taillandier Patrick, Misslin Renaud, Vaguet Alain, Cebeillac Alexandre, Lefebvre Bertrand, Eliot Emmanuel et Vaguet Yvette (Université de Rouen). Les auteurs remercient enfin les relecteurs pour l'ensemble de leurs suggestions.

Introduction

- 1 Les maladies à transmission vectorielle représentent plus de 17 % des maladies infectieuses dans le monde et provoquent plus d'un million de décès chaque année (OMS, 2016¹). Les moustiques *Aedes aegypti* sont l'un des vecteurs reconnus de ces maladies, provoquées notamment par la transmission du virus zika, du chikungunya, de la fièvre jaune ou de la dengue. Cette dernière affecterait à elle seule près de 400 millions de personnes annuellement (Bhatt *et al.*, 2013). L'identification des facteurs liés à la progression de ces maladies d'un point de vue global a des effets limités en termes opérationnels, car le risque d'explosion épidémique résulte d'une articulation complexe de facteurs environnementaux et sociaux locaux (Daudé *et al.*, 2015). En attendant que des vaccins soient disponibles pour lutter contre ces différents virus, les moyens de contrôle de ces maladies transmises par *Aedes aegypti* reposent donc sur la surveillance et les mesures de protections contre ce vecteur (Gubler, 2011 ; WHO, 2012). La suppression des gîtes larvaires (réduction à la source) ou des moustiques par la fumigation et l'épandage d'insecticides sont les mesures les plus employées. Ces opérations nécessitent cependant une coordination des actions entre les opérateurs de santé publique, les administrations locales et les citoyens, ce qui constitue un défi dans de nombreux pays où la coordination intersectorielle et la culture du risque sont faibles (Daudé and Vaguet, 2015). Elles sollicitent également d'importantes ressources humaines et financières, ce qui constitue un autre défi pour les pays en voie de développement (Gubler, 2011).
- 2 Dans sa stratégie globale pour le contrôle et la prévention de la dengue, l'OMS (2012) a une nouvelle fois rappelé la nécessité d'augmenter la capacité de surveillance et de réponse aux épidémies de dengue aux échelles urbaines et intra urbaines. Les modèles spatialisés et dynamiques pour identifier les zones à risque à des échelles fines font partie de cet arsenal de moyens (Guzman *et al.*, 2010).
- 3 C'est dans ce contexte que nous avons développé MOMA (Model Of Mosquito *Aedes aegypti*), un modèle à base d'agents dont l'objectif est de simuler la vie du moustique femelle *Aedes aegypti* (Maneerat, 2016). MOMA s'insère dans un projet de modélisation du système pathogène complexe de la dengue, le projet MO³ (Daudé *et al.*, 2015 ; Daudé, 2017), dans lequel 4 sous-systèmes – le vecteur, l'hôte, le virus et l'environnement – sont mis en interaction afin d'explorer les conditions d'émergence et de propagation des épidémies de dengue en milieu urbain. MOMA représente le sous-système vectoriel où l'entité élémentaire est un moustique, modélisé à l'échelle d'un individu de l'espèce. Cet agent moustique « vit » dans un environnement artificiel caractérisé par des ressources, des contraintes et des objets physiques qu'un moustique peut percevoir. Les simulations présentées dans cet article sont à la fois un support de validation du modèle et une illustration de la possibilité que ce type de modèle peut offrir pour aider à orienter des campagnes de contrôle vectoriel. La dispersion, mesurée par la distance maximale parcourue depuis le lieu d'émergence par les moustiques d'une même cohorte, est l'un des premiers indicateurs à avoir été retenu. Celui-ci peut fournir d'une part des informations sur le potentiel de propagation locale du virus par un moustique contaminé et d'autre part un référentiel pour délimiter le rayon d'épandage d'insecticides autour de cas de dengue. Par ailleurs, la littérature fournit de nombreuses études entomologiques pour cet indicateur, ce qui constitue pour le modélisateur un matériel important pour la validation de son modèle.

Micro-moustique ou Macro-moustique ?

- 4 De nombreux modèles permettent de reproduire des dynamiques de populations animales dans un contexte géographique ou écologique donné sans prendre en compte les détails des systèmes biologiques et comportementaux des individus qui les composent (Hill and Coquillard, 1997). La modélisation par équations différentielles des relations entre températures, précipitations et dynamiques de stock de populations vectorielles repose ainsi sur l'hypothèse de l'existence de lois générales - pas d'eau, pas de moustiques par exemple - jugées peu sensibles, à une échelle donnée, aux bruits de la diversité et des aléas qui existent à des échelles plus petites. Mais, comme souvent, les modèles résistent mal aux changements d'échelles, et le poids de facteurs jugés secondaires à une échelle peuvent, en plus des hétérogénéités locales, apparaître plus importants lorsqu'on s'intéresse aux dynamiques à micro-échelles. C'est le cas par exemple de facteurs tels que la densité relative de gîtes vectoriels, la capacité de déplacement des moustiques, les microclimats urbains ou la présence d'espace verts dans la production et la répartition locale des moustiques. Lorsque les causalités sont nombreuses et interdépendantes, souvent non-linéaires, que les entités agissantes sont hétérogènes, que cette diversité influence les dynamiques et que les données disponibles au niveau populationnel sont parcimonieuses, alors une alternative aux modèles agrégés peut-être intéressante. Il s'agit alors de construire des modèles descriptifs des attributs et des comportements des entités individuelles du système de référence dans le but de produire, via la simulation, des données observables à différentes échelles. Cette démarche n'est possible que si l'on dispose d'une base de connaissances robuste à la fois sur les caractéristiques biologiques et comportementales des entités modélisées. MOMA s'inscrit dans cette perspective : on modélise les comportements élémentaires et le cycle de vie du moustique femelle *Aedes aegypti* selon ses déterminants (états et énergie) et besoins biologiques (recherche de nourritures, de sites de pontes et de lieux de repos) dans un environnement hétérogène et dynamique afin d'observer la géographie de ses lieux de vie, en milieu urbain.
- 5 L'idée d'une modélisation à l'échelle du moustique pour simuler des dynamiques de population n'est pas nouvelle. *CIMSiM* (Focks *et al.*, 1993a, 1993b) est un modèle qui permet d'estimer la capacité de production de moustiques d'un gîte vectoriel sous différentes conditions de températures et de précipitations. Basé sur une table de survie journalière, ce modèle produit les valeurs moyennes de nombreux paramètres entomologiques (âge, abondance, fécondité, etc.) ainsi que la taille de chacun des stocks dans les différents états du moustique pré-adulte (nymphe et larve). Cette approche de microsimulation sera reprise dans *Skeeter Buster* (Magori *et al.*, 2009) pour modéliser les processus de développement intra-récipient, selon les mêmes critères. Plus récemment, le modèle *SimPopMosq* (Almeida *et al.*, 2010) intègre la dimension spatiale au modèle *CIMSiM*. Le modèle repose sur le couplage d'un modèle à base d'agents composé de quatre classes (moustique, humain, chien et chat) avec des données environnementales (gîte vectoriel, chambre et jardin). *SimPopMosq* permet d'étudier la dispersion de moustiques à l'intérieur d'une maison et dans son voisinage immédiat (jardin), ainsi que l'efficacité relative de stratégies de placement de pièges à moustiques. Si la conception de MOMA s'inspire de ces différents travaux, nous élargissons l'emprise spatiale de la modélisation au niveau de plusieurs quartiers urbains et introduisons des dynamiques environnementales dans la simulation. Les paramètres biologiques d'*Ae. aegypti* utilisés dans MOMA proviennent de

Christophers, (1960) ; Focks *et al.*, (1993) ; Magori *et al.*, (2009) et d'une collaboration avec les partenaires entomologistes du projet². La construction de l'environnement de simulation a été réalisée à partir d'enquêtes de terrain menées en 2013 dans plusieurs quartiers de Delhi (Inde) durant les périodes pré et post-mousson. Les données recueillies ont été intégrées dans un système d'information géographique open source (QGIS 2.6.1) et couplées avec des données socio-économiques. Le modèle MOMA a été développé avec la plateforme GAMA 1.6.1 et les données de simulations analysées avec R (x64 3.2.0). MOMA et les bases de données utilisées pour les simulations présentées dans cet article peuvent être téléchargées (DOI : 10.5281/zenodo.48252).

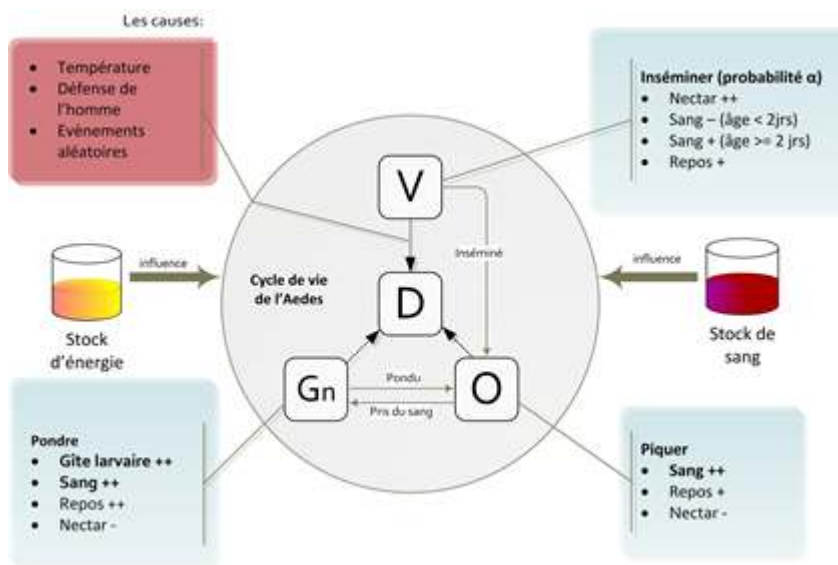
- 6 La section qui suit est une synthèse des principales caractéristiques de MOMA, la description complète du modèle et des paramètres utilisés pour sa calibration est proposée dans (Maneerat and Daudé, 2016). Des scénarios sur le rôle des contextes environnementaux dans la capacité de déplacement et de dispersion des moustiques sont ensuite explorés.

Principales caractéristiques de MOMA

Classes d'agents, états et comportements

- 7 MOMA modélise la femelle adulte *Aedes aegypti* responsable de la transmission de virus lors de ses repas sanguins. Les activités d'*Aedes*³ sont : s'alimenter, se reproduire, se reposer, se déplacer et survivre⁴. Ces activités sont liées à des besoins qui peuvent être assouvis selon la présence de ressources en sang (C1) et en nectar (C2) pour l'alimentation, de gîtes larvaires (C3) pour la reproduction, de zones ombragées (C4) pour le repos et de zones de circulation (C5) pour les déplacements. La survie quant à elle dépend de conditions de température et d'humidité (C6). *Aedes* a une capacité de perception de son environnement limitée à une dizaine de mètres (Christophers, 1960 ; Iams, 2014 ; Kennedy, 1940). Il agit selon son état biologique, défini par ses variables internes, et selon les ressources présentes dans son environnement immédiat. La Figure 1 présente la conception générale des transitions entre les états d'*Aedes* ainsi que les activités et les ressources qui leur sont associés.

Figure 1 – Conception générale du cycle de vie d'Aedes.



Les états et les conditions de transition entre états (sur les flèches pleines) sont représentés dans le cercle grisé avec V (vierge), O (oviposition), Gn (gonotrophique) et D (mort). Les décès sont représentés par les flèches en pointillé et leurs causes sont listées dans le cadre rouge. Les principales actions associées à chaque état de l'agent Aedes sont représentées dans les boîtes bleues, en gras. Suivent les ressources dont le poids sur le comportement d'Aedes varie selon son état, de faible (-) à prioritaire (++) . Les valeurs exactes sont issues de fonctions mathématiques présentées dans (Maneerat et Daudé, 2016).

- 8 La généricité de MOMA est un objectif important du programme de recherche, dont le principe repose sur le postulat de transférabilité des comportements du moustique d'un contexte géographique à un autre. Aedes dispose donc d'un ensemble de compétences qu'il peut utiliser selon ses besoins et son environnement, qui lui est hétérogène. Lorsqu'Aedes a parcouru une certaine distance, son environnement a changé, avec de nouvelles ressources disponibles par exemple. Nous étudierons plus loin les effets de ces changements locaux sur la dispersion des moustiques. Mais la variation de l'environnement et la transférabilité des compétences doivent également être prises comme une opportunité d'appliquer ce modèle de simulation dans d'autres villes, où les *Aedes aegypti* sont ou pourraient être présents.
- 9 Une nouvelle classe agent a donc été créée, elle permet de construire les environnements de simulation. Cette classe, appelée SpatObj, décrit des objets spatiaux tels que des bâtiments, des rues, des espaces verts et des espaces ouverts non végétalisés (parking ou terrain vague par exemple). Ces objets spatiaux possèdent une topologie construite à partir d'un SIG et des attributs qui correspondent aux besoins et aux facteurs qui influencent le moustique. En ce sens les objets spatiaux construits dans MOMA respectent les dimensions spatio-temporelles de l'habitat fonctionnel de l'espèce (Hartemink *et al.*, 2014), ici *Aedes aegypti*. Cet environnement est fait à la fois de contraintes et d'opportunités pour le moustique, et celles-ci peuvent évoluer dans le temps : stocks de sang disponibles à différents moments de la journée⁵, gîtes de ponte ou présence d'ombre⁶ pour le repos par exemple. Les quatre premières ressources (de C1 à C4) d'un SpatObj agissent comme des cibles pouvant être perçues par un Aedes. Les ressources en sang (C1) varient chaque heure selon la fonction du lieu : par exemple un bâtiment de type commerce sera davantage fréquenté durant les heures de la journée, alors qu'un bâtiment

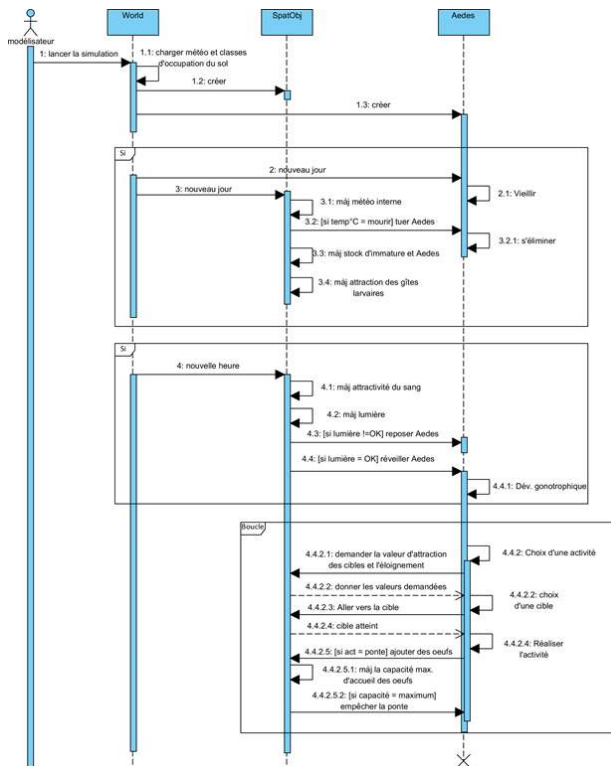
résidentiel le sera en soirée. Le nombre de gîtes en eau (C3) varie chaque jour selon les conditions météorologiques et selon la classe d'occupation du sol. La présence de nectar (C2), comme la présence d'ombre (C4), dépend de la classe d'occupation du sol et de la surface de l'objet. La présence de murs agit sur la capacité de déplacement des moustiques, en limitant le passage d'une maison à une autre. Un coefficient de porosité pour chaque objets spatiaux (C5) a donc été introduit pour simuler cet effet sur le déplacement d'*Aedes*, il agit sur la probabilité de succès de passage entres objets. La porosité d'un objet spatial varie entre 0 (impossibilité de franchir l'objet) et 1 (possibilité de franchir l'objet). La probabilité de passer d'un objet à l'autre est obtenue par le produit des porosités de chaque objet, elle est ensuite confrontée à une valeur aléatoire issue de la loi uniforme entre 0 et 1. Les valeurs de porosité utilisées dans cet article ont été estimées sur le terrain à partir d'une approche comparative, en hiérarchisant les types d'objets selon leur perméabilité au passage de moustiques. En effet, si les maisons individuelles, les bâtiments de grande superficie ou les larges étendues d'eau constituent un obstacle au déplacement d'*Ae. aegypti*, les espaces ouverts ou les parcs peuvent au contraire faciliter la dispersion de cette population (Hemme *et al.*, 2010 ; Mahabir *et al.*, 2012). Chaque objet de chaque classe d'occupation du sol a donc une valeur de porosité définie dans les intervalles suivants : bâtiment [0,3 à 0,5], espace vert et ouvert [0,9 à 1] et routes [0,6 à 0,9]. Ces plages d'intervalles permettent d'introduire une certaine hétérogénéité entre les objets d'une même catégorie, se substituant à une information qui n'est pas représentée dans les tables attributaires telles que le nombre de fenêtres ou de portes d'un bâtiment. Les différences entre les plages de valeurs des différentes classes d'objets permettent quant à elles de respecter les différences entre les catégories d'objets, car il est en général constaté qu'un jardin est plus aisément franchissable par un moustique qu'une très large avenue. La valeur de porosité est donc définie dans l'intervalle par le tirage d'une valeur aléatoire suivant une loi uniforme et enregistrée à l'initialisation comme paramètre de chaque instance de *SpatObj*.

- 10 Un troisième agent est finalement modélisé, appelé World, il représente l'environnement global de la simulation. Cet agent unique contient les données météorologiques sur la période de simulation et gère l'ordonnement des deux autres classes et de leurs agents respectifs. Le temps de la simulation est mis en relation avec le temps physique du monde réel. L'agent World est également responsable de la gestion de l'instanciation, de la destruction et de l'observation des deux autres classes d'agents du système.

Ordonnement local et global

- 11 L'unité spatiale est le mètre (m) et un pas de temps (itération) est fixé à une minute. Le temps d'une simulation se décompose en 3 échelles selon les processus : la journée, l'heure et la minute (Figure 2).

Figure 2- Diagramme de séquence de l'ordonnancement global du modèle.



La partie haute est relative à l'instanciation des agents du modèle, d'abord l'environnement puis les Aedes. Suivent les conditions journalières, horaires et les boucles d'activités par minute.

- 12 Chaque jour, les agents SpatObj accèdent aux informations stockées par l'agent World pour mettre à jour la température locale de l'air et de l'eau et pour éventuellement augmenter le volume en eau des gîtes larvaires. La température de l'air d'un SpatObj contrôle le taux de mortalité des agents Aedes se trouvant dans cet objet. La température de l'eau conditionne la rapidité de développement des moustiques aux stades aquatiques (œufs, larves et nymphes). La présence de gîtes en eau est une ressource pour un Aedes qui recherche un lieu de ponte.
- 13 Chaque heure, les agents SpatObj mettent à jour la luminosité. Cette variable agit sur la période d'activité des Aedes qui y sont localisés. La quantité de ressource en sang disponible est également mise à jour par tranche horaire, celle-ci est issue de lois de distribution spatiale des hôtes selon les types d'objets spatiaux (voir *Supplementary document S3* dans Maneerat and Daudé, 2016).
- 14 Chaque minute, les agents Aedes actifs peuvent observer leur environnement, sélectionner une cible qui répond à leurs besoins et se déplacer. Si aucune cible n'est sélectionnée, car aucune ne peut satisfaire l'un des besoins exprimés, le moustique se déplace au hasard. Si une cible est sélectionnée, Aedes s'oriente (+/- 30°) et se déplace à une vitesse comprise entre 0,5 à 1 m/s vers sa cible (inspiré de Cummins *et al.*, 2012 et Iams, 2014). Les agents Aedes, au cours d'une seule itération, ne peuvent pas se déplacer au-delà des objets spatiaux du voisinage le plus proche de l'objet spatial sur lequel il se situe. Dans le mécanisme de déplacement, le coefficient de porosité joue un rôle important car il va limiter, par exemple, le passage entre un objet spatial de type route et

une maison (effet barrière), alors qu'il va faciliter le passage d'une route à un espace (ou)vert (effet corridor).

Calibration et validation de MOMA

- 15 Plus de 50 paramètres et variables sont utilisés dans le modèle pour caractériser les agents moustiques et l'environnement. Ce niveau de détails de MOMA rend sa calibration et sa validation particulièrement complexe. En effet les combinaisons possibles de paramètres rendent quasiment impossible l'exploration systématique de leurs domaines de variation. La validation a donc été réalisée selon deux critères :
- une validation par dire d'experts : elle a consisté à enregistrer la biographie de chaque *Aedes*, du lieu et moment de naissance au lieu et moment de décès. A chaque itération, les états internes, les actions et les localisations ont été enregistrés dans le but de produire un journal individuel des activités quotidiennes. Ce journal était soumis aux entomologistes qui vérifiaient la cohérence de l'enchaînement des activités dans le temps ainsi que leur durée (voir un exemple de journal dans *Supplementary document S8* (Maneerat and Daudé, 2016)). Des allers-retours entre simulations, avis d'experts / littératures et calibrations ont permis d'améliorer progressivement le réalisme de MOMA ;
 - une validation à partir de données d'enquêtes : la pyramide des âges des populations de moustiques et la dispersion de moustiques autour d'un site de ponte sont deux critères importants dans l'étude des facteurs de diffusion de la dengue. Nous avons donc enregistré ces deux informations afin de les comparer aux données issues d'enquêtes de terrain et disponibles dans la littérature. C'est ce critère de dispersion que nous présentons ici.

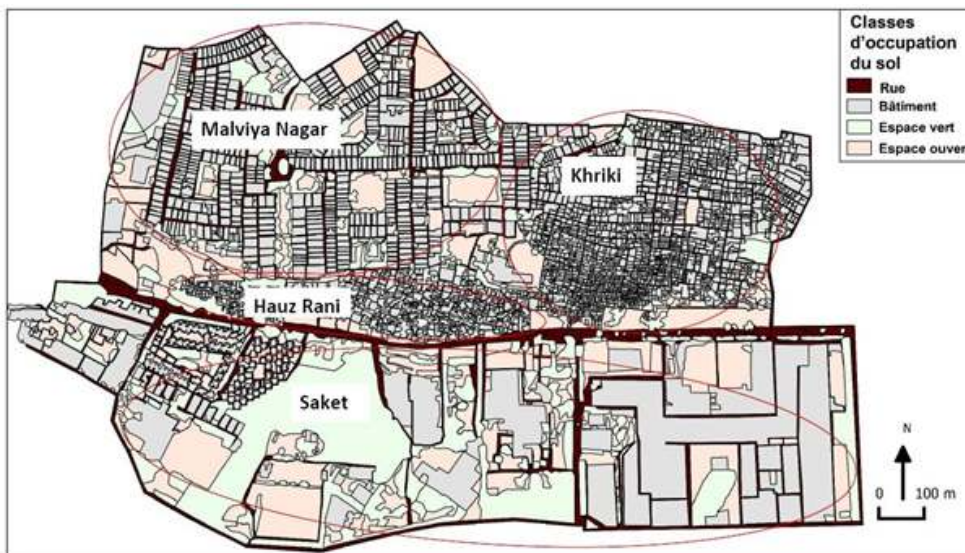
Effets des configurations géographiques locales sur la dispersion des moustiques

- 16 Le déplacement d'un moustique infecté, qui prend deux à trois repas sanguins tous les deux ou trois jours, favorise la dispersion du virus et donc les épidémies locales. Le risque lié à ce déplacement est d'ampleur variable si le moustique se déplace de quelques mètres durant toute sa vie ou de plusieurs centaines de mètres. Il existe quelques études qui tentent de définir cette distance de dispersion maximale de cohortes de moustiques, mais elles sont à la fois peu nombreuses et très contextuelles. La simulation informatique offre l'avantage de dépasser les difficultés de ce type d'enquête, et permet de réaliser de nombreux relevés virtuels, et sur des « terrains » variés. Les scénarii que nous explorons ici ont donc pour objectif d'explorer les effets de l'hétérogénéité locale des objets physiques et de leurs attributs sur la dispersion de cohortes d'*Aedes*. La dispersion dans un scénario correspond à la moyenne des distances maximales atteintes par l'ensemble des moustiques nés d'un même gîte, sur 50 simulations. Un autre indicateur, appelé distance limite, est calculé en prenant en compte à chaque simulation le moustique ayant parcouru la plus longue distance depuis son gîte de naissance. La distance limite moyenne correspond donc à la moyenne des distances limites parcourues par les 50 moustiques les plus « performants » sur 50 simulations.

Un espace virtuel documenté à partir d'un terrain réel

- 17 Une zone située au Sud de Delhi (Inde) a été sélectionnée, elle comprend quatre quartiers contigus présentant d'importantes hétérogénéités en termes d'organisation spatiale et de contexte socio-économique. Cette zone recouvre les quartiers de Malviya Nagar, de Hauz Rani, de Khirki et de Saket (Carte 1), que l'on désigne sous le nom de MHKS. Cette zone d'étude de 1,8 km² a été digitalisée à partir des images aériennes de Google Map, Google Earth et Bing Map puis sauvegardé au format Shapfile (.shp). Ce Shapefile représente la zone de simulation, chaque polygone est associé à une classe d'occupation du sol d'un objet spatial : bâtiment, espace vert, espace ouvert et rue. Les attributs de chacune des classes ont été renseignés à partir d'une enquête de terrain réalisée en juin 2013 à Hauz Rani. Les attributs des objets spatiaux des trois autres quartiers prennent les valeurs moyennes des attributs des objets spatiaux de ce quartier. Ce choix a pour conséquence d'homogénéiser les attributs entre les quartiers mais il permet de focaliser l'analyse sur les effets de la variation des formes et des arrangements spatiaux des objets : avec des niveaux de ressources équivalents par classes d'occupation du sol, est-ce que la configuration des lieux et la dimension des objets influencent la dispersion des moustiques *Aedes* ?

Carte 1 – Les différentes classes d'occupation du sol dans les quartiers de Malviya Nagar, Hauz Rani, Khirki et Saket (Delhi, Inde)




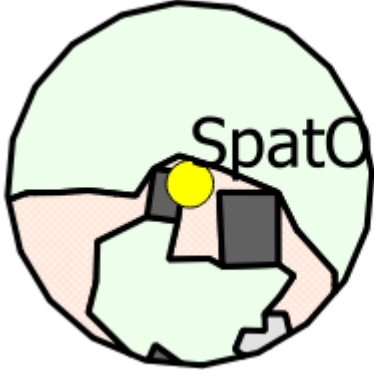
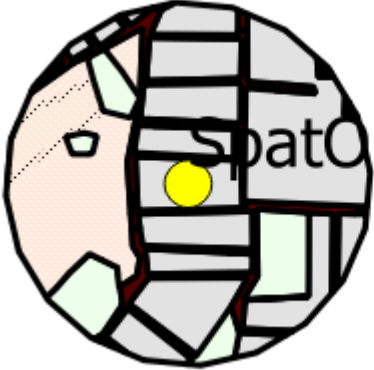

- 18 Les données météorologiques utilisées pour ces simulations ont été enregistrées entre le 1^{er} et le 30 juin 2008 à Delhi⁽⁷⁾. Le mois de juin correspond à la période de pré-mousson. Les précipitations débutent vers la fin du mois. En juin 2008, les conditions météorologiques étaient favorables pour la survie des moustiques, raison pour laquelle nous avons sélectionné cette période afin de limiter le nombre de décès par dessiccation (la température agit sur le taux de survie journalier du moustique). La température a fluctué entre 28 et 37°C avec une moyenne de 30°C, l'humidité a varié de 30 à 80 % avec des journées nuageuses. La pluviométrie moyenne quotidienne était d'environ 4 mm avec quelques jours de forte pluie, notamment durant la seconde quinzaine.



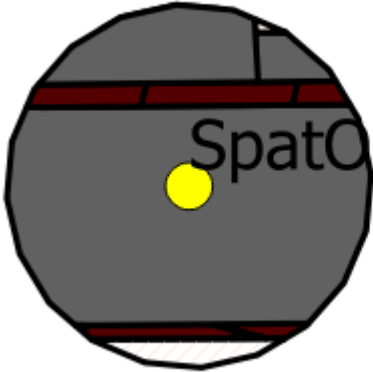
Scénarios des simulations

- 19 La stratégie suivie pour réaliser ces simulations est la suivante : nous sélectionnons 7 objets spatiaux, appelés les 7 scénarii, caractérisés par des usages du sol différents et ayant dans leur voisinage des objets spatiaux de densités et d'organisations différenciées (Tableau 1). Nous calculons pour chacun d'eux le linéaire cumulé et le profil des types d'occupation du sol. Le linéaire de murs de bâtiments donne une indication sur le nombre d'obstacles à franchir dans le scénario, alors que le linéaire des espaces ouverts, tels que les parcs, indique la présence de corridors qui facilite les déplacements à l'intérieur d'un scénario. Notons que ces informations ne sont pas connues des moustiques, elles sont utilisées comme variables descriptives de l'espace pour rechercher des corrélations avec les distances parcourues par les cohortes de moustiques. Un agent *Aedes* connaît néanmoins sa position et la valeur de porosité de l'objet spatial sur lequel il se situe et de celui ciblé.
- 20 Pour chaque scénario, une cohorte de 100 *Aedes* est instanciée, soit 700 *Aedes* pour chaque simulation. Comme une simulation se déroule sur une période d'un mois, nous ne faisons pas émerger de nouveaux *Aedes*. La principale raison de ce choix est que cette étude porte sur la capacité de déplacement du moustique durant sa vie selon différents contextes environnementaux, et pas sur la « conquête » d'un territoire par une cohorte de moustiques et de leurs descendances. Les simulations sont reproduites cinquante fois pour ces sept scénarii. La même graine aléatoire⁸ est utilisée pour toutes les simulations, ceci assure l'identité « biologique » des *Aedes* générés à chaque simulation et l'identité des attributs des objets spatiaux pour les sept scénarii.

Tableau 1 - Description des paysages locaux des 7 scénarii

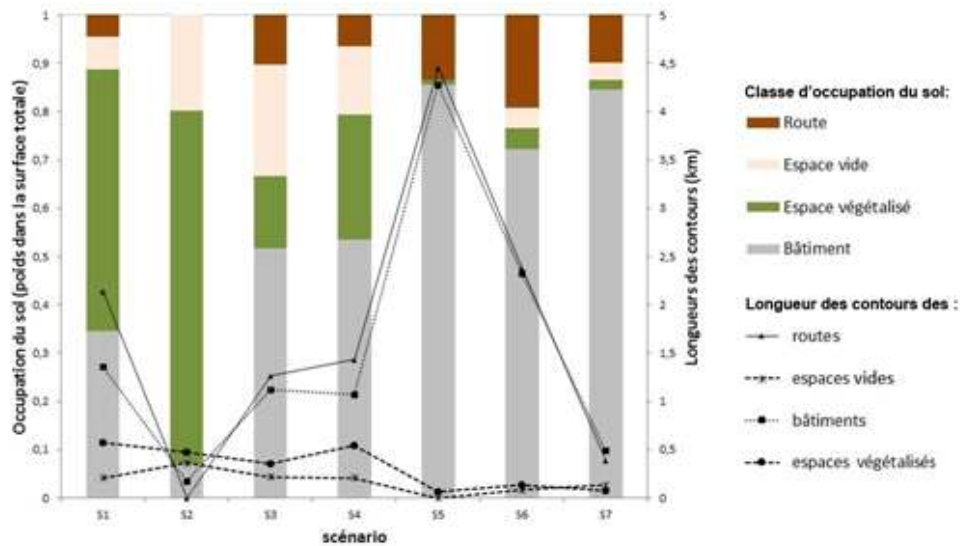
Scénario	Capture du paysage autour (50 m) de la zone d'éclosion (point jaune)	Description de l'environnement du gîte de naissance d'une cohorte d' <i>Aedes</i>
S1		Gîte implanté dans une zone de forte densité de bâti et à proximité d'un grand espace vert.

S2	 <p>SpatObj3352</p>	<p>Gîte situé dans un espace ouvert (parking), entouré d'un vaste espace vert et de quelques bâtiments.</p>
S3	 <p>SpatObj1203</p>	<p>Gîte localisé dans un bâtiment inséré dans une zone aménagée et caractérisée par une faible densité de bâtiments, pourvu d'un petit espace ouvert et des espaces verts. Présence de routes.</p>
S4	 <p>SpatObj3954</p>	<p>Gîte situé dans un bâtiment entre une zone aménagée caractérisée par une faible densité de bâtiment et une zone de forte densité de bâti. Présence de petits espaces verts, d'un espace ouvert et de routes.</p>

S5		<p>Gîte positionné dans un bâtiment faisant partie d'un quartier de très haute densité de bâtiments, avec la présence de nombreuses ruelles.</p>
S6		<p>Gîte dans un bâtiment d'une zone aménagée avec une densité moyenne de bâtiments et la présence de routes et de ruelles.</p>
S7		<p>Gîte déposé dans un grand centre commercial encadré de routes.</p>

- 21 Chaque scénario se caractérise par différentes proportions de classes d'occupation du sol (Figure 3), ce qui permet une importante différenciation inter-scénarii. Par exemple, les espaces verts sont très présents dans le scénario S2 (70 % de la surface totale) par rapport au scénario S7 (moins de 2 %), alors que les routes sont sous-représentées dans le scénario S1 (35 %) par rapport au scénario S6 (73 %).

Figure 3 – Ratio des surfaces occupées par classe d'occupation du sol et longueur des barrières observées (en km) dans un rayon de cinquante mètres pour chacun des 7 scénarios.

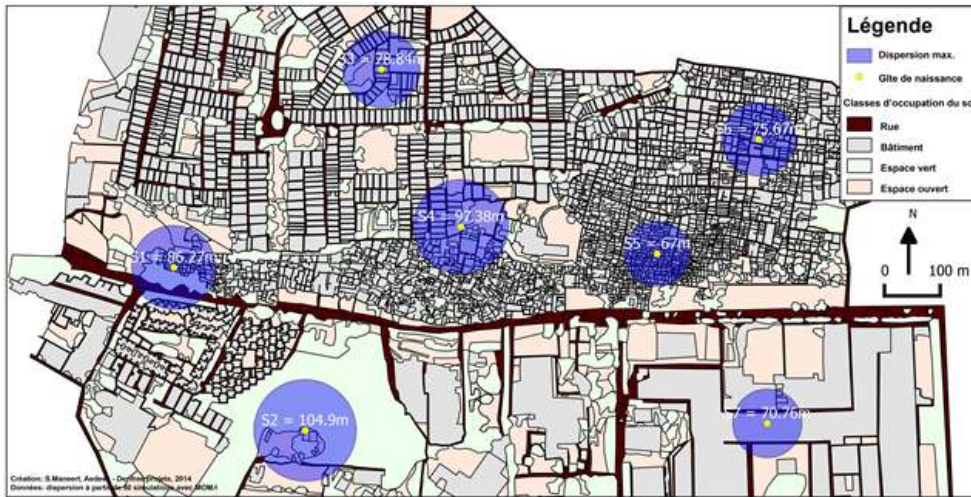


- 22 Pour chaque simulation et pour chaque scénario, lors du décès d'un *Aedes*, la distance maximale parcourue par rapport à l'origine ainsi que son âge sont enregistrés. On distinguera par la suite la distance maximale parcourue par un moustique d'une cohorte de la distance moyenne parcourue par tous les moustiques d'une même cohorte. Dans le premier cas les moyennes sont calculées sur 50 moustiques, dans le second sur 5000, pour 50 simulations par scénario.

Résultats et discussion

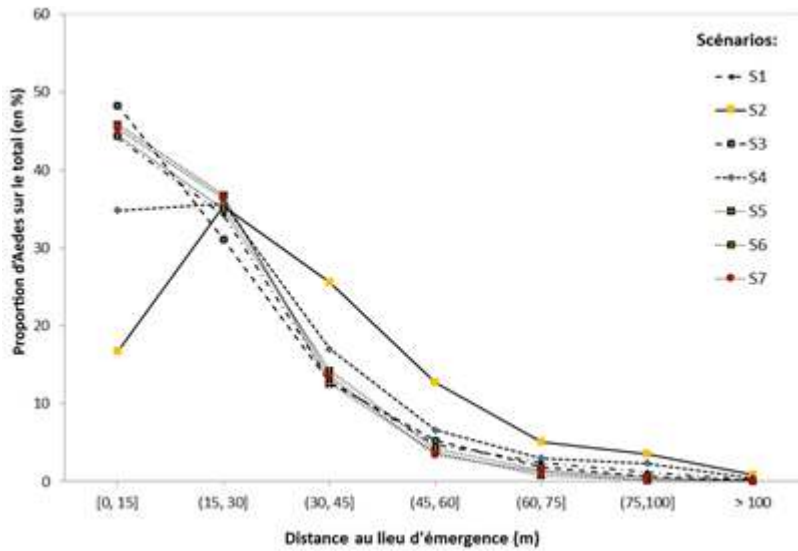
- 23 Les distances maximales parcourues dans chacun des 7 scénarii (Carte 2) montrent que les *Aedes* sont relativement sédentaires au regard de leur capacité de locomotion, avec une distance limite d'une centaine de mètres au plus autour des lieux d'émergence. La plus petite distance maximale atteinte est de 67 mètres dans le scénario S5 et la plus grande est de 105 mètres dans le scénario S2. Ces deux scénarii ont des caractéristiques spatiales très différentes (Figure 3), respectivement très densément bâti pour l'un (avec de nombreuses barrières de type mur) et majoritairement caractérisé par des espaces verts (donc ouvert) pour l'autre.
- 24 La dispersion moyenne dans les sept scénarii est par construction plus faible, elle est égale à 22,36 m avec un écart-type de 5,11 m. Ces données simulées sont conformes aux quelques études de terrain réalisées dans différents contextes géographiques, qui montrent que les *Aedes aegypti* s'éloignent peu de leur lieu d'émergence, entre 16 et 25 m. dans Muir and Kay, (1998) et 30,5 m. dans Ordóñez-Gonzalez et al., (2001).

Carte 2 – Dispersion maximale simulée pour les Aedes nés dans 7 « paysages » urbains différents



- 25 En moyenne dans les différents scénarii, entre 50 et 80 % des Aedes n'ont pas dépassé la zone des 30 m autour du site d'émergence, et moins de 10 % ont dépassé les 60 m. Cette faible distance de dispersion est probablement due à (1) la disponibilité et l'abondance des ressources nécessaires à la survie d'Aedes dans un environnement fortement urbanisé et (2) aux effets de barrière induits par les aménagements urbains. En effet, les besoins et la capacité de déplacement du moustique dépendent des caractéristiques de son environnement local, avec lequel il interagit. Si le moustique dispose à l'endroit où il se trouve de toutes les ressources nécessaires à sa survie et à son développement, alors il sera peu stimulé pour se déplacer. Au contraire dans une situation de pénurie locale de l'une ou l'autre de ces ressources, l'espace peut faciliter son déplacement, comme c'est le cas dans le scénario 2, ou le contraindre dans la recherche de nouvelles ressources. Dans ce cas, la configuration de l'espace mesurée par le linéaire de murs ou par le nombre d'obstacles qu'il doit franchir pour se déplacer doit jouer un rôle important dans ce potentiel de dispersion.
- 26 Un test du khi-2 portant sur la dispersion moyenne des moustiques dans la couronne des 100 mètres autour du lieu d'émergence et dans les 7 scénarii permet de rejeter l'hypothèse d'homogénéité des comportements de dispersion de ces cohortes ($\alpha = 5\%$). Chaque cohorte a donc un comportement de dispersion qui lui est spécifique et qui dépend du contexte local dans lequel elles ont été lâchées. Ce résultat est l'expression d'une très forte concentration des moustiques dans la zone des 30 m autour du lieu de naissance et d'une importante différenciation entre les scénarii dans cette zone (Figure 4). La répartition des populations d'Aedes dans l'intervalle des 0 - 15 m distingue fortement les scénarii S2 et S3, qui rassemblent respectivement 16,76 % et 48,3 % de leur population. Ceci peut s'expliquer par l'existence d'un environnement beaucoup plus ouvert en S2 qu'en S3, avec des longueurs cumulées de barrières respectivement égales à 0,17 km et 2,38 km. De ce fait, les Aedes nés dans le scénario S2 volent plus loin que ceux nés en S3, jusqu'à une distance supérieure à 100 m. On peut également observer ce phénomène avec le scénario S5 où la présence de nombreuses barrières et l'absence d'espace vert sont associées à une très faible dispersion des Aedes.

Figure 4 - Distance maximale de vol d'une population de 100 Aedes en fonction de différents contextes environnementaux.



- 27 Le coefficient de détermination (R^2) entre la dispersion maximale des Aedes et les barrières cumulées dans leurs espaces de vie est donc relativement élevé ($R^2 = 0,68$, $P < 0,05$), dans le sens d'une relation négative. C'est l'effet « saut d'obstacle » : au plus le parcours est contraint, au moins le moustique s'éloigne de son lieu de naissance. La dispersion des moustiques a par ailleurs fortement tendance ($R^2 = 0,75$, $P < 0,01$) à augmenter avec la diminution du nombre de gîtes de ponte disponibles dans les maisons et les bâtiments. C'est l'effet « pénurie » des sites de ponte intra-domiciliaire qui conduit les Aedes nés à l'intérieur des bâtiments à en sortir pour rechercher dans les zones péri-domiciliaires des gîtes potentiels. Une fois à l'extérieur (résidences, bâtiments), on observe une augmentation de la dispersion avec l'augmentation des gîtes disponibles ($R^2 = 0,74$, $P < 0,01$). C'est l'effet « abondance », il permet aux moustiques situés dans un environnement ouvert tel qu'un parc d'avoir une offre plus importante de gîtes vierges et donc favorise sa dispersion dans l'espace. Ce phénomène est modélisé dans la mesure où Aedes préférera, lorsque la situation se présente, pondre dans plusieurs gîtes proches, en privilégiant les gîtes vierges (Christophers, 1960). MOMA reproduit finalement assez bien le principal motif de déplacement chez *Ae. aegypti* qui semble associé à la recherche de sites de reproduction et de ressources en sang, qui sont la plupart du temps ubiquistes en milieu urbain (Harrington *et al.*, 2005). L'effet barrière est donc à relativiser par le niveau de disponibilité des ressources à cette échelle. Cela signifie que si le sang et les gîtes larvaires sont disponibles en abondance, on observera une sédentarisation des populations de moustiques.
- 28 Ces résultats peuvent être utilisés dans le cadre de stratégies d'éradication des moustiques. A Delhi (Inde), lors de l'enregistrement d'un cas de dengue par le système de surveillance, une équipe est responsable de l'épandage d'insecticide dans le foyer et dans son voisinage afin de minimiser le risque de contamination (Daudé and Mazumdar, 2016). Or l'estimation des limites de la zone à contrôler n'est pas aisée et se réalise la plupart du temps selon l'appréciation de l'équipe sur le terrain. Les zones ainsi traitées peuvent varier entre une dizaine et plusieurs centaines de mètres autour de la maison du cas index. Or toutes choses égales par ailleurs (gîte, sang, ombre), l'équation de la droite de

régression⁹ permet d'estimer le potentiel de dispersion des *Aedes*. Nous avons appliqué cette équation par cellule de 50 m sur la zone MHKS lorsque varie la contrainte de barrières. La Carte 3 représente à une résolution fine la probabilité qu'auraient des moustiques issus d'une cohorte née en un lieu d'en sortir pour aller coloniser des espaces environnant¹⁰. Employée dans le contexte de fumigation d'insecticides, celle-ci fournit une estimation du « risque de diffusion locale du virus » : les zones les plus rouges présentent le risque maximum car des moustiques qui y seraient infectés pourraient en sortir et contaminer des hôtes éloignés du cas index. Ces zones rouges, situées essentiellement dans le quartier Saket, correspondent à la présence d'un grand parc proche des zones commerciales. Elles s'opposent aux zones plus fermées comme le quartier Khirki (en jaune) et Khirki extension (en beige) où les bâtiments sont imbriqués les uns dans les autres avec des commerces et des routes sinueuses jonchées de déchets solides.

Carte 3 – Estimation de la propension à la dispersion des moustiques à partir de leur lieu d'émergence et selon l'hétérogénéité à micro échelle (50x50 m) des paysages urbains.



- 29 Ces simulations fournissent donc un indicateur qui permet de déterminer les surfaces à traiter en cas de présence d'un cas de dengue. L'intuition initiale qui était que des espaces « fermés » présenteraient une faible probabilité de dispersion des moustiques est ainsi confirmée, et les simulations en fournissent une représentation cartographique objective. Pragmatiquement cela conforte la stratégie qui consisterait à utiliser une image aérienne sur site via une application mobile, Google Map par exemple, pour évaluer rapidement l'étendue de la zone à traiter autour d'un cas index selon la densité de bâti, la présence de corridors, de parcs et d'espaces ouverts.
- 30 Le second intérêt de ce jeu de simulations est de fournir une équation de dispersion des vecteurs en fonction d'une caractéristique urbaine, mesurée ici par le linéaire des objets d'une même catégorie, identifiable et calculable via des outils de traitement d'images satellites par exemple. Cette équation peut alors être employée dans un modèle vectoriel non plus à l'échelle du moustique mais à l'échelle d'une cohorte de moustiques pour en simuler la dispersion, premier pas vers une réduction-simplification du modèle comportemental MOMA.

Conclusion

- 31 MOMA est un laboratoire virtuel dans lequel le cycle de vie du moustique *Aedes aegypti* est modélisé. Construit et paramétré à partir des connaissances acquises sur le terrain et d'expériences de laboratoires, l'objectif a été de modéliser *Aedes aegypti* à un niveau de détails des comportements de déplacement, de prédation et de ponte qui permettent de produire des données macroscopiques réalistes. MOMA est simulé dans un environnement décrit selon les besoins et les contraintes qui peuvent influencer les comportements du moustique. Un travail de vérification des sorties des simulations réalisé avec des entomologistes a permis de vérifier que les activités circadiennes du moustique étaient conformes aux connaissances du domaine. Cette première étape de validation « interne » nous a alors conduit à instancier plusieurs centaines de moustiques afin d'étudier un critère important pour l'intervention contre la transmission de maladies à transmission vectorielles, la dispersion de cohortes de moustiques, pour laquelle nous disposons d'études empiriques. Les résultats obtenus sont convergents avec ces études et sont une nouvelle étape dans la validation du modèle. Ils permettent ainsi d'enrichir notre compréhension de la faible dispersion des moustiques en milieu urbain.
- 32 La mise en évidence de contextes géographiques locaux favorables ou non à la dispersion des moustiques constitue une information utile pour les campagnes d'éradication des moustiques. Dans les zones de bâti denses, les capacités de vol des moustiques peuvent être très réduites du fait de la présence de nombreux murs d'habitations ou de fenêtres fermées. Au contraire dans des milieux moins denses en bâti, l'existence de parcs ou d'espaces publics peut permettre aux moustiques de parcourir de plus grandes distances. Ces premiers résultats, inférés à l'échelle d'une ville grâce aux méthodes de télédétection par exemple, permettraient d'identifier les caractéristiques des zones urbaines qui favorisent potentiellement la présence de hot-spots de moustiques.
- 33 Ces résultats orientent également de nouvelles recherches sur les effets de l'abondance des ressources dont les moustiques ont besoin sur leur dispersion. En effet, au-delà des effets de l'environnement physiques sur le comportement du moustique, la disponibilité des ressources nécessaires à sa survie est également déterminante. Ainsi l'hétérogénéité de la présence des hôtes pour les repas sanguins, l'hétérogénéité des gîtes potentiels pour les lieux de pontes et l'hétérogénéité des espaces sombres et humides pour les lieux de repos sont probablement des facteurs qui coexistent pour expliquer l'hétérogénéité spatiale et temporelle des densités vectorielles. La recherche d'effets de seuil dans la disponibilité de ces différentes ressources, au-delà desquels les moustiques seraient amenés à se déplacer davantage pour assouvir leurs besoins ou mourir du fait d'une trop forte compétition sur la ressource, fera l'objet de prochaines simulations.
- 34 Le choix d'une modélisation à l'échelle du moustique, aussi peu parcimonieuse en termes de comportements implémentés et en nombre de paramètres, n'a pas été sans un certain nombre de verrous qu'il a fallu faire sauter, de la conception à la communication des résultats. L'essentiel des difficultés dans l'utilisation de ces modèles comportementaux avec un important niveau de détails vient du fait que des changements dans un paramètre, un comportement ou un descripteur spatial peuvent avoir des répercussions, par effet domino, sur des composants éloignés aussi bien du point de vue algorithmique que thématique. Il faut donc vérifier, à partir de l'enregistrement de variables témoins, que toute modification d'une condition ne fait pas sortir ces éléments témoins de leur

plage de variation jugée acceptable par les spécialistes du domaine. Ces variables témoins peuvent être une pyramide des âges des populations de moustiques, des densités par mètre carré, ou des biographies telles que nous les avons évoquées. Une fois ces conditions respectées, alors les simulations permettent d'explorer des scénarii qu'il serait impossible à observer *in situ*. Enfin, les choix faits ici dans la modélisation des structures et des dynamiques environnementales et des dynamiques de population d'hôtes, très parcimonieux par rapport au modèle du moustique, impactent très probablement sur les résultats des simulations. Ces deux composants essentiels de la dynamique de la dengue sont donc en cours d'amélioration, notamment avec l'usage de la télédétection pour qualifier de manière systématique l'environnement et l'exploitation de données issues des réseaux sociaux pour calibrer les mobilités quotidiennes des hôtes en zone urbaine.

BIBLIOGRAPHIE

- Almeida, S.J.D., Ferreira, R.P.M., Eiras, Á.E., Obermayr, R.P., Geier, M., 2010. "Multi-Agent Modeling and Simulation of an *Aedes Aegypti* Mosquito Population", *Environmental Modelling & Software*, vol. 25, No.12, 1490–1507; doi:10.1016/j.envsoft.2010.04.021.
- Bhatt, S., Gething, P.W., Brady, O.J. Messina, J.P, Farlow, A.W., Moyes, C.L., Drake, J.M. et al., 2013. "The Global Distribution and Burden of Dengue", *Nature*, vol. 496, No.7446, 504–507; doi:10.1038/nature12060.
- Christophers, S.R., 1960, *Aedes Aegypti (L.) The Yellow Fever Mosquito- Its Life History, Bionomics and Structure*, Cambridge at the university press.
- Cummins, B., Cortez, R. Foppa, I.M., Walbeck, J., Hyman, J.M., 2012. "A Spatial Model of Mosquito Host-Seeking Behavior", *PLoS Computational Biology*, vol. 8, No.5, Public Library of Science: e1002500; doi:10.1371/journal.pcbi.1002500.
- Daudé, É., 2017. "Les systèmes pathogènes complexes, modélisation et simulation", *Revue Francophone sur la Santé et les Territoires*.
- Daudé, É., Mazumdar, S., 2016. "Combating Dengue in India", *Eco. Wkly*, vol. 51, No.8, 77–81.
- Daudé, É., Vaguet, A., 2015. "Surveillance, contrôle et épidémies de dengue en Inde : Qui a échoué ?" *L'Espace Politique : Revue en ligne de géographie politique et de géopolitique* [En ligne], (Géo) politique et Santé + Varia No.26, 2015-2. URL : <http://espacepolitique.revues.org/3485> ; doi :10.4000/espacepolitique.3485.
- Daudé, É, Vaguet, A., Paul, R., 2015. "La dengue, maladie complexe", *Natures Sciences Sociétés*, vol. 23, No.4, 331–342 ; doi :10.1051/nss/2015058.
- Focks, D., Haile, D.G., Daniels,E., Mount, G., 1993a. "Dynamic Life Table Model for *Aedes Aegypti* (Diptera: Culicidae): Analysis of the Literature and Model Development", *Journal of Medical Entomology*, vol. 30, 1003–17; doi:10.1093/jmedent/30.6.1003.
- Focks, D., Haile, D.G., Daniels,E., Mount, G., 1993b. "Dynamic Life Table Model for *Aedes Aegypti* (Diptera: Culicidae): Simulation Results and Validation", *Journal of Medical Entomology*, vol. 30, 1018–28; doi:10.1093/jmedent/30.6.1018.

- Gubler, D.J., 2011. "Dengue, Urbanization and Globalization: The Unholy Trinity of the 21st Century", *Tropical Medicine and Health*, vol. 39, (4SUPPLEMENT): S3–11; doi:10.2149/tmh.2011-S05.
- Guzman, M.G., Halstead, S.B., Artsob, H., Buchy, P., Farrar, J., Gubler, D.J., Hunsperger, E. et al., 2010. "Dengue: A Continuing Global Threat", *Nature Reviews Microbiology*, vol. 8, No.12, S7–S16; doi:10.1038/nrmicro2460.
- Harrington, L.C., Scott, T.W., Lerdthusnee, K., Coleman, R.C., Costero, A., Clark, G.G., Jones, J.J. et al., 2005. "Dispersal of the Dengue Vector *Aedes Aegypti* within and between Rural Communities", *The American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*, vol. 72, No.2, 209–20; doi:72/2/209.
- Hartemink, N., Vanwambeke, S.O., Purse, B.V., Gilbert, M., Dyck, V., 2014. "Towards a Resource-Based Habitat Approach for Spatial Modelling of Vector-Borne Disease Risks", *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society*, vol. 90, No.4, 1151–62; doi:10.1111/brv.12149.
- Hemme, R.R., Clayton L.T., Dave D.C., David W.S., 2010. "Influence of Urban Landscapes on Population Dynamics in a Short-Distance Migrant Mosquito: Evidence for the Dengue Vector *Aedes Aegypti*", *PLoS Neglected Tropical Diseases*, vol. 4, No.3: e634; doi:10.1371/journal.pntd.0000634.
- Hill, D., Coquillard, P., 1997. *Modélisation et Simulation D'écosystèmes. Des Modèles Déterministes Aux Simulations À Événements Discrets*. Recherche. Paris : Masson.
- Iams, S.M., 2014. *Characterizing Mosquito Flight Using Measurement and Simulation* (Thèse), Cornell University.
- Kennedy, J.S., 1940. "The Visual Responses of Flying Mosquitoes", *Proceedings of the Zoological Society of London*, vol. A109, No.4: 221–42; doi:10.1111/j.1096-3642.1940.tb00831.x.
- Magori, K., Mathieu L., Molly E.P., Dana A.F., Thomas, W.S., Alun, L.L., Fred, G., 2009. "Skeeter Buster: A Stochastic, Spatially Explicit Modeling Tool for Studying *Aedes Aegypti* Population Replacement and Population Suppression Strategies", Edited by Pattamaporn Kittayapong. *PLoS Neglected Tropical Diseases*, vol. 3, No.9: e508; doi:10.1371/journal.pntd.0000508.
- Mahabir, R.S., Severson, D.W., Chadee, D.D., 2012. "Impact of Road Networks on the Distribution of Dengue Fever Cases in Trinidad, West Indies", *Acta Tropica*, vol. 123, No.3; doi:10.1016/j.actatropica.2012.05.001.
- Maneerat, S., 2016. *Modélisation à base d'agents des risques vectoriels en milieux urbains : exemple d'*Aedes aegypti*, vecteur de la dengue, à Delhi (Inde)*. Thèse de doctorat, Université de Rouen.
- Maneerat, S., Daudé, É., 2016. "A Spatial Agent-Based Simulation Model of the Dengue Vector *Aedes Aegypti* to Explore Its Population Dynamics in Urban Areas", *Ecological Modelling* à paraître; doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2016.04.012.
- Muir, L.E., Kay, B.H., 1998. "Aedes Aegypti Survival and Dispersal Estimated by Mark-Release-Capture in Northern Australia", *American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*, vol. 58, No.3: 277–82.
- Ordóñez-Gonzalez, J G, Mercado-Hernandez, R., Flores-Suarez, a E., Fernández-Salas, I., 2001. "The Use of Sticky Ovitrap to Estimate Dispersal of *Aedes Aegypti* in Northeastern Mexico", *Journal of the American Mosquito Control Association*, vol. 17, No.2: 93–97.
- WHO. 2012. "WHO | Global Strategy for Dengue Prevention and Control, 2012–2020", World Health Organization [En ligne]. URL: <http://www.who.int/denguecontrol/9789241504034/en/>

NOTES

1. <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs387/en/>
2. Notamment Louis Lambrechts, Anna-Bella Failloux et Richard Paul (Institut Pasteur de Paris).
3. Nous appelons Aedes un agent qui représente le moustique *Aedes aegypti*.
4. La survie n'est pas à proprement parler une activité, c'est une fonction biologique qui conditionne la probabilité de survivre à des conditions de température et d'humidité données.
5. Dans MOMA, l'hôte n'est pas modélisé en tant qu'entité individualisée mais en tant que variable de stock, voir *Supplementary document S3* dans (Maneerat and Daudé, 2016).
6. La partie ombragée d'un objet spatial représente le pourcentage de sa surface totale qui n'est pas exposé au rayonnement solaire. Elle a été estimée à partir d'observations sur le terrain et des images satellites. Cette variable représente essentiellement l'ombre générée par des bâtiments ou par la position relative des objets spatiaux.
7. <http://www.imd.gov.in>
8. «Graine aléatoire » ou « *random seed* » est un nombre choisi pour l'initialisation des variables par un générateur de nombre pseudo-aléatoire dans un langage informatique.
9. $y = -2.9991x + 91.408$ avec (y) la capacité de dispersion des moustiques dans les zones voisines en fonction des km de barrières rencontrées dans l'espace (x).
10. Méthode de classification par ruptures naturelles (Jenks).

RÉSUMÉS

D'importants moyens humains et financiers sont déployés pour limiter la présence d'*Aedes aegypti*, principal vecteur de la dengue, de la fièvre jaune, du chikungunya et du virus Zika. Ces moyens ont notamment pour objectif d'identifier, via des études de terrain, les principales caractéristiques des espaces de vie de ce moustique pour mieux cibler les opérations de contrôle vectoriel. Une alternative à ces enquêtes consiste à évaluer les caractéristiques de ces lieux de vie en s'appuyant sur des modèles. C'est en partie dans ce contexte que nous avons développé le modèle de simulation MOMA (Model Of Mosquito *Aedes aegypti*). MOMA est un modèle à base d'agents qui intègre un ensemble de connaissances sur la biologie et les comportements du moustique *Aedes aegypti*. Celui-ci évolue dans un environnement de simulation construit selon ses besoins et ses contraintes spécifiques. Ce laboratoire virtuel, construit en collaboration avec des entomologistes, nous a permis de montrer que la sédentarisation du moustique *Aedes aegypti* pouvait provenir d'une part des nombreux obstacles au déplacement en milieu urbain et d'autre part de l'abondance des différentes ressources dont il a besoin pour vivre et se reproduire. Cet article présente le modèle MOMA et sa capacité à reproduire des connaissances de terrain, telles que la dispersion de cohortes de moustiques dans différents contextes spatiaux. Son environnement de simulation est calibré à partir de données collectées dans un quartier de Delhi (Inde). Les résultats des simulations confirment la capacité du modèle à reproduire des faits observés et rapportés dans de nombreuses études de terrain et permet d'envisager l'utilisation de MOMA sur des terrains moins arpentés de la géographie du moustique *Aedes aegypti*.

In order to fight against the transmission of dengue, yellow fever, chikungunya and Zika viruses, significant resources were allocated to the process of restricting the propagation of their main vector, the *Aedes aegypti* mosquito. Research on this mosquito's living areas is thus necessary to characterize more precisely the areas that need to be monitored and treated. An alternative to field surveys consists of evaluating the characteristics of these living areas through spatialized models. It is in this context that we developed the simulation model MOMA (Model Of Mosquito *Aedes aegypti*), an agent-based model which integrates a vast set of biological and behavioural knowledge about the mosquito in a simulation environment based on the needs and constraints specific to *Aedes aegypti*. In this paper, we present MOMA and a study of the effects of local configurations on the dispersion capacity of mosquito cohorts. The simulations in this study were carried out using data from an urban neighbourhood in the city of Delhi (India). This virtual laboratory, constructed in collaboration with entomologists, thus makes it possible to represent the mosquito's living areas, which are either restricted or facilitated by spatial amenities conditioning its needs and its capacity of movement during its lifetime.

为了对抗登革热，黄热病，基孔肯雅病毒和寨卡病毒的传播，大量的资源被用于限制其主要载体埃及伊蚊的繁殖。因此，要准确地描述需要监测和进行干预的区域，我们必须对这种蚊子的生存区域进行研究。实地调查的替代方案包括通过空间模型评估这种蚊子生活区域的特征。正是在这种背景下，我们开发了模拟模型MOMA（埃及伊蚊模型），这是一种基于代理的模型，并基于针对埃及伊蚊的特定的需求和限制，在模拟环境中整合了大量关于蚊子的生物学和行为学知识。在本文中，我们介绍了MOMA和关于地域特征对蚊群的扩散能力的影响的一项研究。本研究中的模拟是使用德里市（印度）城市社区的数据进行的。这个虚拟实验室是与昆虫学家合作建造的，因此可以代表蚊子的生活区域，这些生活区域受到空间设施的限制或促进，而这些空间措施决定了蚊子的一生中的需求和运动能力。

INDEX

Mots-clés : simulation à base d'agents, risque, urbain, modélisation, dengue, santé

Keywords : dengue, health, agent-based model, risk, urban area, modeling/modelling

AUTEURS

SOMSAKUN MANEERAT

CNRS - UMR IDEES

Université de Rouen, France

maneerat.somsakun@gmail.com

ÉRIC DAUDÉ

CNRS - UMR IDEES

Université de Rouen, France

eric.daude@cnrs.fr