



HAL
open science

Modélisation de l'impact des îlots de chaleur urbains sur les dynamiques de population d'*Aedes aegypti*, vecteur de la dengue et du virus Zika

Thomas Huraux, Renaud Misslin, Alexandre Cebeillac, Alain Vaguet, Eric Daudé

► To cite this version:

Thomas Huraux, Renaud Misslin, Alexandre Cebeillac, Alain Vaguet, Eric Daudé. Modélisation de l'impact des îlots de chaleur urbains sur les dynamiques de population d'*Aedes aegypti*, vecteur de la dengue et du virus Zika. SAGéo, EA LITIS; UMR IDEES, Nov 2017, ROUEN, France. halshs-01650033

HAL Id: halshs-01650033

<https://shs.hal.science/halshs-01650033v1>

Submitted on 28 Nov 2017

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.

Modélisation de l'impact des îlots de chaleur urbains sur les dynamiques de population d'*Aedes aegypti*, vecteur de la dengue et du virus Zika

Thomas Huraux, Renaud Misslin, Alexandre Cebeillac,
Alain Vaguet, Éric Daudé

Laboratoire IDEES, CNRS UMR 6266 – Université de Rouen, France
prenom.nom@univ-rouen.fr

RÉSUMÉ. Les moustiques de l'espèce *Aedes aegypti* sont les vecteurs les plus compétents pour la transmission du virus Zika, de la dengue et du Chikungunya. Ce moustique s'est parfaitement adapté aux environnements urbains où sa présence doit être surveillée et contrôlée, notamment en l'absence de vaccin efficace contre ces différents virus. Notre approche repose sur une méthodologie alternative à l'observation *in situ* des populations d'*Aedes*, rendu difficile en raison même de la complexité des environnements urbains. Face à la difficulté de collecter des données épidémiologiques ou entomologiques de qualité sur le terrain, nous utilisons la simulation à base d'agents pour faire interagir dans un seul modèle des vecteurs, des hôtes et des environnements dynamiques. Nous illustrons notre approche par une étude des effets des facteurs environnementaux sur les dynamiques de population de moustiques. Dans cet article, nous testons l'hypothèse d'un impact des îlots de chaleur urbains sur le maintien de population de moustiques et sur la variabilité des dynamiques de leurs populations à Bangkok.

ABSTRACT. Mosquitoes of the species *Aedes aegypti* are the most competent vectors for the transmission of the Zika, dengue and Chikungunya viruses. This mosquito is perfectly suited to urban environments where its presence must be monitored and controlled due to the difficulty of fighting it. In this paper, we present an alternative methodology to *in situ* observation of these populations, made difficult due to the complexity of urban environments. We use agent-based modeling to study the effects of environmental factors on mosquito population dynamics and to estimate their local densities. We illustrate the potential of the simulator by testing the hypothesis of the impact of urban heat islands on mosquito populations in Bangkok.

MOTS-CLÉS : Modélisation à Base d'Agents; Environnement Dynamique; Maladies à Transmission Vectorielle

KEYWORDS: Agent-Based Modeling; Dynamic Environment; Vector Born Diseases

SAGEO'2017 - Rouen, 6-9 novembre 2017

1. Introduction

Les arboviroses constituent un défi majeur de santé publique notamment dans les pays de la zone inter et sub-tropicale. La dengue comptabiliserait ainsi plus de 390 millions d'infections par an¹ et les récentes épidémies liées à la diffusion du virus Zika (*e.g.* 2007 sur l'île de Yap, 2015 au Brésil) illustrent à nouveau la nécessité d'une veille épidémiologique et vectorielle permanente. Dans ce contexte, les responsables de santé publique et les décideurs politiques ont besoin de nouveaux moyens pour lutter contre ces maladies. La réponse aux risques épidémiques passe aujourd'hui par deux approches : la recherche vaccinale (Capeding *et al.*, 2014) et la lutte anti-vectorielle (Ooi *et al.*, 2006). Cette dernière nécessite des innovations dans ses méthodes d'observation, de lutte et de contrôle du fait de la capacité d'adaptation des vecteurs aux pratiques humaines et aux variations environnementales. Dans ses recommandations, l'OMS (2012) souligne le rôle que pourrait prendre les modèles dynamiques spatialisés et à micro-échelles dans la compréhension des mécanismes en jeu dans ces épidémies. C'est dans cette stratégie que s'inscrit notre projet de recherche sur le système pathogène complexe de la dengue (Daudé *et al.*, 2015). Notre contribution se situe (i) au niveau de la compréhension des mécanismes de reproduction, de prédation et de dispersion du vecteur *Aedes aegypti*, moustique responsable de la transmission de la dengue et du virus Zika et (ii) au niveau de l'étude du rôle des mobilités humaines dans la diffusion du virus aux échelles intra-urbaines. Le développement et la dispersion de ces virus sont en effet fortement liés aux contextes et aux dynamiques de l'environnement qui agissent sur les densités de population vectorielles et aux mobilités humaines qui sont susceptibles de favoriser la diffusion par saut (Hägerstrand, 1970) du virus lorsque des hôtes sont infectés (Wesolowski *et al.*, 2015; Li *et al.*, 2013) : diffusion par saut international avec le transport aérien, diffusion par saut national avec les transports routiers et ferroviaires, et enfin diffusion par saut local avec les mobilités urbaines quotidiennes.

En se basant sur une approche systémique, dynamique et complexe pour la modélisation de l'environnement, du moustique vecteur de la dengue et des mobilités humaines (Daudé *et al.*, 2015), notre modèle utilise le paradigme de la modélisation à base d'agents qui présente de nombreux intérêts pour la modélisation et la simulation des systèmes complexes en général (Treuil *et al.*, 2008) et des systèmes pathogènes complexes en particulier (Curtis, Riva, 2009; Daudé, 2017). Nous proposons dans un premier temps (section 2) un état de

1. d'après l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs117/en/>

l'art sur (i) la simulation spatiale des vecteurs de maladies virales et (ii) la problématique des îlots de chaleur. Nous présentons dans un second temps (section 3) l'approche générale du simulateur MO³ en insistant sur le modèle environnement. Ces éléments nous conduisent dans la section 4 à présenter un ensemble de simulations visant à étudier le rôle des îlots de chaleur urbains sur les dynamiques de population de moustiques à Bangkok.

2. Simulation spatiale et épidémiologie

Malgré l'importance de l'hétérogénéité spatiale pour la simulation et la mise en place d'actions de lutte anti-vectorielle (Dufourd, Dumont, 2013), peu de modèles spatialement explicites visent à simuler les dynamiques de population d'*Aedes aegypti* dans des environnements hétérogènes. Certains modèles mathématiques stochastiques (Magori *et al.*, 2009) reposant sur l'utilisation de matrices (Souza *et al.*, 2013; Evans, Bishop, 2014) ou d'automates cellulaires (Hosen *et al.*, 2016) prennent en compte l'aspect spatial des dynamiques vectorielles mais considèrent l'environnement comme homogène. Inversement, d'autres modèles incluent des variables environnementales temporelles, principalement météorologiques, pour simuler les dynamiques des populations de moustiques, mais ces modèles ne sont alors pas spatialement explicites (Williams *et al.*, 2008; Erickson *et al.*, 2010; De Garin *et al.*, 2000). Les modèles visant à simuler la diffusion de maladies transmises par *Aedes aegypti* ou les dynamiques vectorielles peuvent être séparés en trois catégories : les modèles mathématiques à base d'équations différentielles, les automates cellulaires et les modèles à base d'agents décrit par des règles de transitions et des modèles comportementaux.

Les modèles mathématiques (Tran, Raffy, 2006; Dufourd, Dumont, 2013; Lutambi *et al.*, 2013) et les automates cellulaires (Ferreira *et al.*, 2006; Otero *et al.*, 2008; Gouvêa Jr., 2017) sont généralement parcimonieux en termes de représentation de l'environnement et/ou des mobilités humaines. Malgré leur intérêt pour le calcul des déplacements de volumineuses cohortes de moustiques et pour l'étude des relations entre le vecteur, l'hôte, le virus et l'environnement, ces deux types de modèles ne peuvent être employés pour tester des hypothèses au niveau d'un quartier ou d'une ville ou encore pour servir d'aide à la décision auprès des autorités sanitaires.

La plupart des modèles à base d'agents développés pour étudier la diffusion de la dengue, du Zika ou de leur vecteur sont également relativement économes en termes de représentation de l'environnement (Deng *et al.*, 2008; Jacintho *et al.*, 2010; Gunaratne *et al.*, 2016; Borges *et al.*, 2015) et présentent donc des limites similaires à celles des deux premières catégories de modèles. L'approche géographique que nous présentons dans la suite de cet article permet de reproduire les dynamiques vectorielles dans des environnements dynamiques, hétérogènes et spatialement explicites. De nombreuses études interrogent les re-

lations entre la température et la distribution temporelle de cas de dengue ou de population d'*Aedes aegypti*. Des études montrent des relations temporelles à la fois fortes et positives entre le nombre de moustiques et les variables météorologiques (les précipitations, les températures et parfois l'humidité) (Vezzani *et al.*, 2004; Barrera *et al.*, 2011; Ibarra *et al.*, 2013). Par exemple à Buenos Aires où les températures moyennes mensuelles sont comprises entre 2 °C et 25 °C), on a observé que les populations d'*Aedes aegypti* augmentaient significativement (Vezzani *et al.*, 2004) lorsque les températures dépassaient 20,8 °C et lorsque les précipitations excédaient 150 mm par mois, .

L'étude des relations entre les distributions spatiales de la température à haute résolution et en milieu urbain et des populations de moustiques *Aedes aegypti* est moins courante. Pourtant, de nombreuses études de climatologie urbaine et de micro-climatologie ont montré que les températures pouvaient varier sur de courtes distances aux échelles intra-urbaine (Voogt, Oke, 2003). Les caractéristiques des températures micro-locales sont donc à cette échelle susceptibles d'impacter les populations de moustiques et leur capacité vectorielle (Lambrechts *et al.*, 2011; Liu-Helmersson *et al.*, 2014). À Delhi (Inde) par exemple, où les hivers sont extrêmement rigoureux relativement à la plage des températures de confort du moustique, certains quartiers au profil thermal plus chaud que les autres pourraient être des espaces de repli, des poches de chaleur, pour les moustiques durant la saison inter-épidémique (Misslin *et al.*, 2016). Ces espaces, caractérisés par un bâti très dense pourraient ainsi offrir tout au long de l'hiver les ressources nécessaires à la survie et à la reproduction des populations de moustiques (Tsunoda *et al.*, 2014).

Dans ce contexte, nous posons l'hypothèse selon laquelle durant la saison inter-épidémique, ces poches de chaleur facilitent le maintien voire la prolifération des moustiques et sont susceptibles de maintenir un niveau d'incidence à bas bruit entre deux périodes épidémiques, suffisant pour que les épidémies repartent lorsque arrivent la saison des pluies et que les populations vectorielles augmentent à nouveau. L'analyse des caractéristiques micro-climatiques intra-urbaines pourrait alors permettre, si cela était confirmé, d'identifier ce type de zones et révéler ainsi des contextes environnementaux restreint en dehors des périodes épidémiques. Des stratégies de surveillance et de contrôle vectoriels dans ces zones en période inter-épidémique pourraient avoir des effets plus que proportionnels sur la lutte contre les épidémies. La simulation du vecteur dans ces environnements permet alors de définir sous quelles conditions un stock minimum de moustiques peut se maintenir et favoriser la circulation du virus tout au long de l'année dans ces poches.

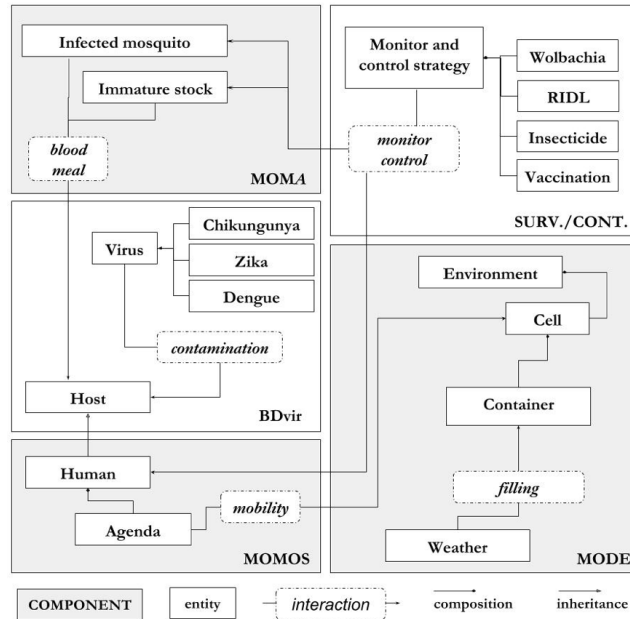


FIGURE 1. Les principaux composants du modèle MO³

3. Conception du simulateur MO³

MO³ est un simulateur développé sous la plate-forme GAMA². Son développement fait partie d'un projet ayant pour objectif la modélisation à base d'agents du système pathogène complexe de la dengue (Daudé *et al.*, 2015). Trois modèles sont développés dans le cadre de ce projet (figure 1) : le modèle MOMA (Maneerat, Daudé, 2016) du vecteur *Aedes aegypti*, le modèle MODE (Misslin, Daudé, 2016) de l'environnement du vecteur et le modèle MOMOS qui décrit les mobilités quotidienne des hôtes potentiels (Cebeillac *et al.*, 2017). Ces trois modèles sont intégrés à MO³ dans lequel nous ajoutons un modèle qui décrit les interactions de contamination entre un vecteur et un hôte (BDvir) et un module permettant de contrôler les simulations et de tester différents scénarios. Les simulations présentées dans cet article ont pour objectif d'explorer les dynamiques de populations vectorielles lorsque les conditions climatiques varient, couvrant ainsi la fin de l'hiver et le début de la saison épidémique. Si les modèles MOMOS et BDvir ne sont donc pas ici activés, nous les présentons malgré tout brièvement dans les sections suivantes.

2. <http://gama-platform.org/>

3.1. Dynamiques environnementales

Les dynamiques de l'environnement sont simulées par le sous-modèle à base d'agents MODE (Misslin, Daudé, 2016). Les agents de ce modèle sont des cellules qui représentent une portion de l'espace urbain sur lequel le modèle est appliqué. Ces cellules sont caractérisées par 3 paramètres environnementaux qui influencent le comportement d'*Aedes aegypti* (voir la figure 2) : la température de l'air, la végétation et les gîtes larvaires potentiels ou GLP (récipients pouvant contenir de l'eau claire). À ces 3 ressources ou conditions spatialisées s'ajoute une ressource donnée pour l'ensemble de la zone d'étude : les précipitations. Chaque agent de l'environnement (cellule) dispose également de méthodes qui décrivent les dynamiques de mise en eau des gîtes larvaires potentiels (remplissage et vidange) et la variation des températures. Ces dernières varient selon des données issues d'images thermales MODIS (satellites Aqua et Terra). Lorsque la couverture nuageuse est trop épaisse, certains pixels sont susceptibles de présenter des valeurs nulles. Si cette situation se présente, MODE attribue aux zones concernées une valeur de température globale issue d'une station météorologique (*e.g.* Thai Meteorological Department³ à Bangkok). La résolution spatiale d'une cellule est de 30×30 m, elle correspond à celle des images Landsat 8 (OLI). Cette résolution est conforme avec la superficie moyenne de « l'espace de vie » du moustique observée par des études de type mark-release-recapture (marquage-libération-recapture) (Getis *et al.*, 2003). Elle correspond également à la distance de dispersion moyenne maximale de cohortes de moustiques simulée dans un contexte urbain (Maneerat, Daudé, 2016). Cette résolution est utilisée dans d'autres modèles de simulation (Karl *et al.*, 2014). Les méthodes d'estimation des caractéristiques environnementales utilisées par MODE sont applicables à différents types de zones urbaines (Misslin, Daudé, 2016)⁴.

3.2. Modèle du moustique *Aedes aegypti*

Le modèle MOMA est un modèle comportemental intégré au sein du simulateur MO³ et qui permet de simuler l'effet des caractéristiques de l'environnement (les densités de population humaine, la disponibilité de lieux de ponte potentiels, l'organisation du bâti, *etc.*). Pour des simulation à l'échelle de la ville, les principaux comportements du moustique ainsi que les différentes étapes de son cycle de vie sont représentés dans MO³ sous la forme de stocks agrégés au niveau de la cellule de 30×30 m.

MOMA décrit le cycle de vie d'*Aedes aegypti*, il se divise en quatre phases successives : œuf, larve, nymphe et adulte. La femelle *Aedes* pond générale-

3. <https://www.tmd.go.th/en/>

4. Les images satellites utilisées par MODE sont issues de satellites couvrant la quasi-totalité de l'espace terrestre (Terra et Aqua (MODIS) et Landsat 8) dont les données sont mises à disposition librement.

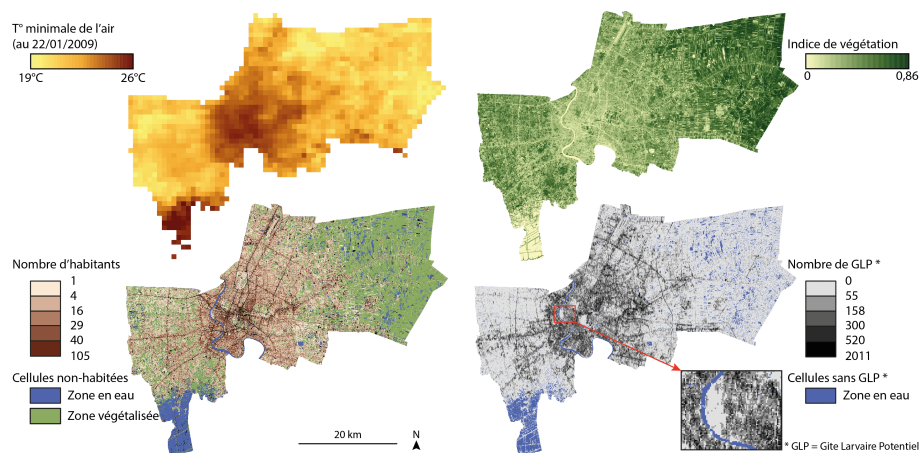


FIGURE 2. *MODE* combine la température de l'air estimée, le niveau de végétation (NDVI), la répartition de la population et la répartition des gîtes larvaires potentiels afin de reconstituer l'environnement d'*Aedes aegypti*.

ment dans des récipients contenant de l'eau claire (Christophers, 1960). Le développement de l'œuf commence au moment où il entre en contact avec l'eau. Cette phase de développement dure 2 à 3 jours selon les conditions de température de l'eau (Christophers, 1960). Le moustique passe au stade larvaire au moment de l'éclosion. Les larves sont capables de se déplacer dans l'eau pour respirer et pour se nourrir. Au bout de 4 à 6 jours (selon la température de l'eau notamment (Carrington *et al.*, 2013)), la larve passe au stade de nymphe (Christophers, 1960). Cette phase de développement dure approximativement 7 jours lorsque les conditions sont moyennes mais peut être largement écourtée (2 jours au minimum) en fonction de la température (Focks *et al.*, 1993). Le développement du moustique est jusque-là totalement contraint par la présence d'eau dans les gîtes larvaires ce qui explique le lien très fort qui existe entre l'incidence des arboviroses et les précipitations. Par exemple pour la dengue à Delhi (Inde), la saison épidémique correspond à la période de mousson. Une fois la phase aquatique terminée, le moustique passe à son stade aérien. Les femelles entament leur cycle gonotrophique au cours duquel elles sont amenées à piquer des mammifères (essentiellement des humains). Le prélèvement de sang leur permet d'obtenir l'énergie dont elles auront besoin lors de la phase d'oviposition.

4. Dynamiques des populations de moustiques à Bangkok

Dans cet article, nous souhaitons vérifier si l'existence d'îlots de chaleur à Bangkok, capitale de la Thaïlande, influe sur l'évolution des densités de

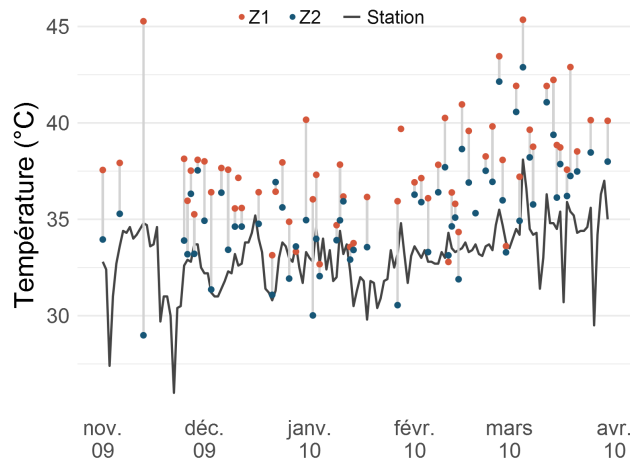


FIGURE 3. Médianes des températures journalières maximales issues des stations météorologiques (température globale) et des images thermales MODIS (zones 1 et 2)

moustiques à l'échelle intra-urbaine. Bangkok est une mégapole de 9.2 millions d'habitants en 2015. Il s'agit d'une ville très étendue, d'une superficie de 1 568 km². Les densités de population de Bangkok varient fortement, entre un centre urbain très dense et une proche périphérie agricole caractérisé par de vastes étendues végétalisées. Cette densité de population se retrouve dans les densités d'espaces bâtis, qui elles même participent à l'amplitude de variation des températures de l'air (figure 3).

Pour étudier les variations de populations de moustiques selon les variations de températures, nous avons sélectionné 2 zones d'approximativement 85 km², toutes deux situées sur le territoire de la Bangkok Metropolitan Administration (BMA) (figure 4). La première zone (zone 1) correspond au centre de Bangkok. C'est une zone très urbanisée et densément peuplée au sein de laquelle les températures sont généralement plus élevées qu'en périphérie de la ville. La deuxième zone (zone 2) est périphérique et les températures y sont plus fraîches (voir la figure 3). Les 2 zones présentent de nombreuses différences en termes de densité de population et d'occupation du sol (par exemple le bâti est bien plus lâche en zone 2). Afin de tester l'impact de la température sur la prolifération des moustiques, nous avons choisi d'appliquer les températures de la zone 2 à la zone 1, de même dimension. Les autres paramètres environnementaux sont les mêmes pour les deux zones. Dans le cadre de cette étude, la population d'hôtes, générée avec le modèle de mobilité MOMOS (Cebeillac *et al.*, 2017), est utilisée uniquement pour les repas sanguins des moustiques. Le tableau 1 donne les principaux paramètres utilisés pour les simulations de cet article. Les conditions initiales du système reposent à la fois sur des données

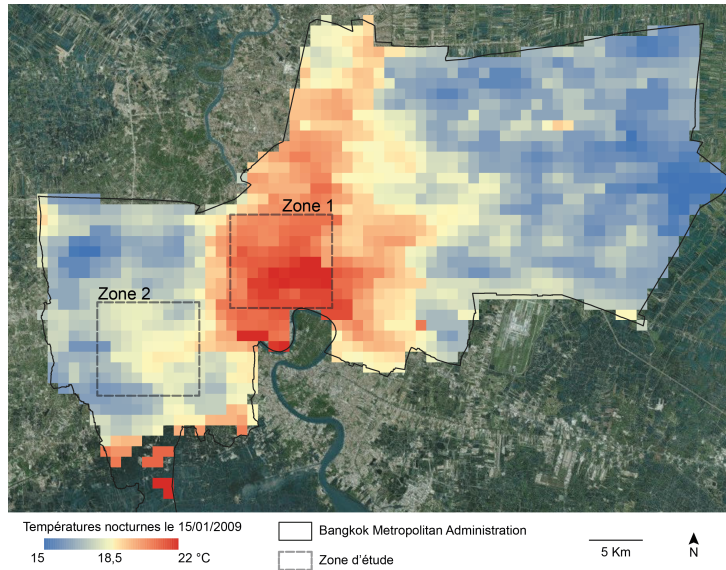


FIGURE 4. Les deux zones d'étude : une zone centrale chaude (zone 1) et une zone périphérique plus fraîche (zone 2)

TABLE 1. Principaux paramètres utilisés pour les simulations avec MO^3

Paramètre	Valeur	Référence
Nb. initial de moustiques par GLP	[0, 10]	/
Taux de survie journalier du moustique	0.86	(Maneerat, 2016)
Taux de survie pendant la transition entre des stades aquatiques	0.7	(Magori <i>et al.</i> , 2007)
Délai de ponte post-repas (jours)	[2, 3]	(Christophers, 1960)
Quantité d'œufs par ponte	[100, 120]	(Christophers, 1960)
Nb. max. de morsures par jour et par humain	[1, 3]	(Costero <i>et al.</i> , 1999)

de terrain, sur des données issues de la littérature ou sont *ad'hoc* à ce travail. Nous avons choisis de laisser le système stabiliser les populations d'*Aedes* par ses différentes régulations thermiques, taux de survie et compétitions spatiales. Nous avons instancié 95 400 agents de type *environnement* et 85 000 agents de type *humain* à l'aide du générateur de population synthétique Gen*⁵ (soit 10 % de la population réelle de la zone).

5. <https://github.com/ANRGenstar>

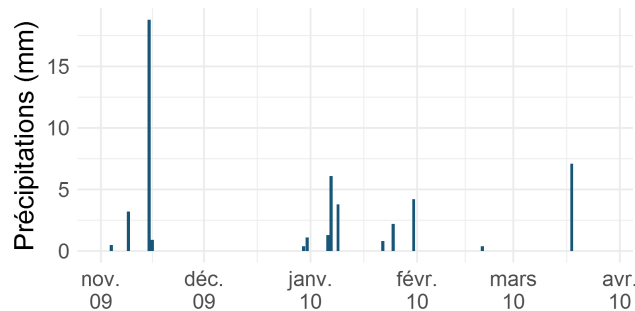


FIGURE 5. Précipitations journalières à Bangkok de nov. 2009 à avr. 2010

Dans un premier temps, nous avons réalisé 30 simulations sur la période inter-épidémique de novembre 2009 à avril 2010 dans la zone 1 avec les températures réellement mesurées dans cette zone. La figure 6 illustre la capacité du simulateur à reproduire l'évolution des populations pré-adultes et adultes d'*Aedes aegypti*, notamment les différents pics de croissances liés aux précipitations. En comparant les précipitations (figure 5) à l'évolution des stocks (figure 6), on retrouve une corrélation entre les premières périodes de pluie et les principaux pics de population (notamment le nombre d'œufs et de larves). Par exemple, le pic du nombre d'œufs culminant le 24 novembre 2009 (figure 6) est directement lié aux précipitations ayant eu lieu le 14 novembre 2009. Le pic de fin novembre 2009 est suivi d'un second pic, dont le maximum correspond au 9 décembre 2009. Les 15 jours qui séparent les deux pics correspondent à la durée d'un cycle gonotrophique. Les moustiques nés suite au premier pic pondent simultanément, provoquant l'apparition d'un second pic. Il est important de noter que ces deux pics successifs et le nombre de jours qui les séparent correspondent aux situations observées par les entomologistes en conditions réelles (Wee *et al.*, 2013).

Dans un second temps, nous avons réalisé 30 simulations en utilisant les caractéristiques environnementales de la zone 1 en leur appliquant les données thermales de la zone 2. Comme on peut le constater sur la figure 7, le nombre de moustiques est plus élevé avec les températures de la zone 1 qu'avec celles de la zone 2, notamment lors des pics de la saison inter-épidémique (de novembre à fin février). Ces résultats permettent d'apporter un premier élément de réponse à l'hypothèse selon laquelle la présence d'un îlot de chaleur urbain influencerait les dynamiques de population d'*Aedes aegypti*. En revanche, ils ne permettent pas de défendre totalement l'hypothèse d'un maintien d'une population de moustiques plus importante dans les zones plus chaudes du centre-ville pendant la saison inter-épidémique, du moins à Bangkok. En effet, les stocks moyens de moustiques adultes sont parfois moins importants avec les températures de la zone 1 qu'avec celles de la zone 2. Cette différence pourrait s'expliquer par des températures trop chaudes pour une durée de nymphose optimale.

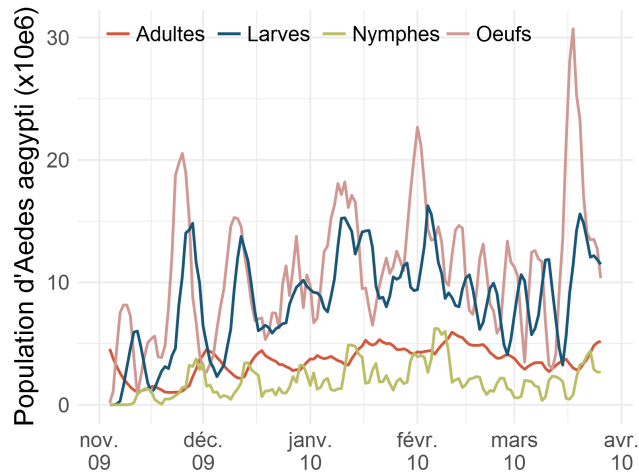


FIGURE 6. Évolution des stocks moyens d'*Aedes* pré-adultes et adultes dans la zone 1 (courbe lissée par des moyennes mobiles sur 5 valeurs)

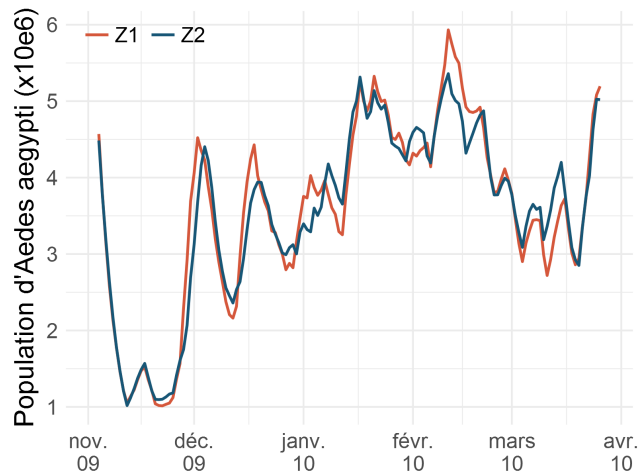


FIGURE 7. Évolution des stocks moyens d'*Aedes* adultes dans la zone 1 (courbe lissée par des moyennes mobiles sur 5 valeurs)

5. Conclusion

Dans cet article, nous avons exploré l'effet d'un îlot de chaleur urbain sur les populations du moustique *Aedes aegypti*, vecteur de la dengue et du Zika. Nos premiers résultats corroborent l'hypothèse d'une augmentation du nombre de moustiques du fait de la présence d'un îlot et nous encourageant à continuer nos travaux dans ce sens. MO³ est construit pour pouvoir être appliqué à n'importe

quelle ville touchée par une maladie transmise par *Aedes aegypti*. De ce fait, l'une des perspectives de ce travail est d'étudier l'effet de l'îlot de chaleur urbain sur les populations de moustiques (et potentiellement sur la diffusion d'une épidémie) dans une autre ville que celle de Bangkok. Nous souhaitons notamment transférer le modèle à la ville de Delhi (Inde). Cette ville est soumise à des hivers plus rigoureux que la ville de Bangkok. Du fait de ses températures hivernales plus froides et d'après les résultats présentés dans ce travail, il est probable que l'îlot de chaleur urbain de Delhi ait un impact plus important sur l'évolution des stocks de moustiques adultes que celui de Bangkok. Au cours de l'année 2017, nous aurons accès à une grille de calcul qui nous permettra, d'une part de mieux calibrer notre modèle (notamment les populations de moustiques pré-adultes et adultes à l'initialisation) et d'autre part, de simuler l'intégralité de la ville de Bangkok. Enfin, nous travaillons actuellement à la transformation du simulateur MO³ en laboratoire virtuel permettant de tester des stratégies de contrôle vectoriel (*e.g.* fumigation, réduction du nombre de gîtes larvaires), des moyens d'action au niveau des individus (*e.g.* limiter la mobilité des individus infectés, tester des moyens de protection individuelle) ou encore des politiques de vaccination.

Bibliographie

- Barrera R., Amador M., MacKay A. J. (2011, décembre). Population Dynamics of *Aedes aegypti* and Dengue as Influenced by Weather and Human Behavior in San Juan, Puerto Rico. *PLoS Neglected Tropical Diseases*, vol. 5, n° 12.
- Borges F., Moon A., Suppi R., Luque E., Brito Arduino (de) M. (2015). An agent-based model for assessment of *aedes aegypti* pupal productivity. In *Proceedings of the 2015 Winter Simulation Conference*. Huntington Beach, L. Yilmaz, W. K. V. Chan, I. Moon, T. M. K. Roeder, C. Macal, and M. D. Rossetti.
- Capeding M. R., Tran N. H., Hadinegoro S. R. S., Ismail H. I. H. M., Chotpitayasunondh T., Chua M. N. *et al.* (2014). Clinical efficacy and safety of a novel tetravalent dengue vaccine in healthy children in asia: a phase 3, randomised, observer-masked, placebo-controlled trial. *The Lancet*, vol. 384, n° 9951, p. 1358–1365.
- Carrington L. B., Seifert S. N., Willits N. H., Lambrechts L., Scott T. W. (2013). Large diurnal temperature fluctuations negatively influence *aedes aegypti* (diptera: Culicidae) life-history traits. *Journal of medical entomology*, vol. 50, n° 1, p. 43–51.
- Cebeillac A., Daudé E., Huraux T. (2017). Where? when? and how often? what can we learn about daily urban mobilities from twitter data and google map in bangkok (thailand), and what are the perspectives for dengue studies? *Netcom*, "In Press".
- Christophers S. R. (1960). *Aedes aegypti* (L.) the yellow fever mosquito: its life history, bionomics and structure. *Cambridge University Press*.

- Costero A., Edman J. D., Clark G. G., Kittayapong P., Scott T. W. (1999). Survival of starved *aedes aegypti* (diptera: Culicidae) in puerto rico and thailand. *Journal of medical entomology*, vol. 36, n° 3, p. 272–276.
- Curtis S., Riva M. (2009, jun). Health geographies I: complexity theory and human health. *Progress in Human Geography*, vol. 34, n° 2, p. 215–223.
- Daudé É. (2017). Les systèmes pathogènes complexes - Modélisation et Simulation. In RFST (Ed.),, p. 2–6. Revue Francophone sur la Santé et les Territoires.
- Daudé E., Vaguet A., Paul R. (2015, octobre). La dengue, maladie complexe. *Natures Sciences Sociétés*, vol. 23, n° 4, p. 331–342.
- De Garin A., Bejarán R. A., Carbajo A. E., Casas S. C. de, Schweigmann N. J. (2000). Atmospheric control of *Aedes aegypti* populations in Buenos Aires (Argentina) and its variability. *International journal of biometeorology*, vol. 44, n° 3, p. 148–156.
- Deng C., Tao H., Ye Z. (2008, octobre). Agent-based modeling to simulate the dengue spread. In X. Li, K. Liu, X. Zhang, A. Chen (Eds.),, p. 71431O.
- Dufourd C., Dumont Y. (2013, novembre). Impact of environmental factors on mosquito dispersal in the prospect of sterile insect technique control. *Computers & Mathematics with Applications*, vol. 66, n° 9, p. 1695–1715.
- Erickson R. A., Presley S. M., Allen L. J., Long K. R., Cox S. B. (2010, décembre). A dengue model with a dynamic *Aedes albopictus* vector population. *Ecological Modelling*, vol. 221, n° 24, p. 2899–2908.
- Evans T. P. O., Bishop S. R. (2014, août). A spatial model with pulsed releases to compare strategies for the sterile insect technique applied to the mosquito *Aedes aegypti*. *Mathematical Biosciences*, vol. 254, p. 6–27.
- Ferreira C. P., Pulino P., Yang H. M., Takahashi L. T. (2006, décembre). Controlling Dispersal Dynamics of *Aedes aegypti*. *Mathematical Population Studies*, vol. 13, n° 4, p. 215–236.
- Focks D. A., Haile D., Daniels E., Mount G. A. (1993). Dynamic life table model for *aedes aegypti* (diptera: Culicidae): analysis of the literature and model development. *Journal of medical entomology*, vol. 30, n° 6, p. 1003–1017.
- Getis A., Morrison A. C., Gray K., Scott T. W. (2003). Characteristics of the spatial pattern of the dengue vector, *Aedes aegypti*, in Iquitos, Peru. *American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*, p. 494–505.
- Gouvêa Jr. M. M. (2017, mars). Time-spatial model on the dynamics of the proliferation of *Aedes aegypti*. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, vol. 44, p. 130–143.
- Gunaratne C., Akbas M. I., Garibay I., Ozmen O. (2016). Evaluation of Zika Vector Control Strategies Using Agent-Based Modeling. *arXiv preprint arXiv:1604.06121*.
- Hosen P. E., Djatna T., Khusun H. (2016, mars). A Cellular Automata Modeling for Visualizing and Predicting Spreading Patterns of Dengue Fever. *TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, vol. 14, n° 1, p. 228.

- Hägerstrand T. (1970). What about people in regional science? *Papers of Regional Science Association*, vol. 24, p. 7-21.
- Ibarra A. M. S., Ryan S. J., Beltrán E., Mejia R., Silva M., Munoz A. (2013, novembre). Dengue Vector Dynamics (*Aedes aegypti*) Influenced by Climate and Social Factors in Ecuador: Implications for Targeted Control. *PLoS ONE*, vol. 8, n° 11, p. e78263.
- Jacintho L. F., Batista A. F., Ruas T. L., Marietto M. G., Silva F. A. (2010). An agent-based model for the spread of the Dengue fever: a swarm platform simulation approach. In *Proceedings of the 2010 Spring Simulation Multiconference*, p. 2. Society for Computer Simulation International.
- Karl S., Halder N., Kelso J. K., Ritchie S. A., Milne G. J. (2014). A spatial simulation model for dengue virus infection in urban areas. *BMC Infectious Diseases*, vol. 14, n° 1, p. 447.
- Lambrechts L., Paaijmans K., Fansiri T., Carrington L., Kramer L., Thomas M. *et al.* (2011). Impact of daily temperature fluctuations on dengue virus transmission by *Aedes aegypti*. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America PNAS, Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 108, n° 18, p. p. 7460–7465.
- Li S., Tao H., Xu Y. (2013). Abiotic determinants to the spatial dynamics of dengue fever in guangzhou. *Asia Pacific Journal of Public Health*, vol. 25, n° 3, p. 239–247.
- Liu-Helmersson J., Stenlund H., Wilder-Smith A., Rocklöv J. (2014, mars). Vectorial Capacity of *Aedes aegypti*: Effects of Temperature and Implications for Global Dengue Epidemic Potential. *PLoS ONE*, vol. 9, n° 3, p. e89783.
- Lutambi A. M., Penny M. A., Smith T., Chitnis N. (2013, février). Mathematical modelling of mosquito dispersal in a heterogeneous environment. *Mathematical Biosciences*, vol. 241, n° 2, p. 198–216.
- Magori K., Huang Y., Legros M., Puente M., Gould F., Lloyd A. (2007). Gene-drive models of mosquitoes—a users’ manual.
- Magori K., Legros M., Puente M. E., Focks D. A., Scott T. W., Lloyd A. L. *et al.* (2009, septembre). Skeeter Buster: A Stochastic, Spatially Explicit Modeling Tool for Studying *Aedes aegypti* Population Replacement and Population Suppression Strategies. *PLoS Neglected Tropical Diseases*, vol. 3, n° 9, p. e508.
- Maneerat S. (2016). *Modélisation à base d’agents des risques vectoriels en milieu urbain : exemple d’aedes aegypti, vecteur de la dengue, à delhi (inde)*. Thèse de doctorat non publiée, Université de Rouen.
- Maneerat S., Daudé E. (2016, août). A spatial agent-based simulation model of the dengue vector *Aedes aegypti* to explore its population dynamics in urban areas. *Ecological Modelling*, vol. 333, p. 66–78.
- Misslin R., Daudé E. (2016). Génération d’environnements artificiels pour la simulation spatiale d’arboviroses. In *Actes de la conférence SAGEO’2016*. Nice.
- Misslin R., Telle O., Daudé E., Vaguet A., Paul R. E. (2016, octobre). Urban climate versus global climate change-what makes the difference for dengue?: Climate,

- dengue, and urban heat islands. *Annals of the New York Academy of Sciences*, vol. 1382, n° 1, p. 56–72.
- Ooi E.-E., Goh K.-T., Gubler D. J. (2006, juin). Dengue prevention and 35 years of vector control in Singapore. *Emerging infectious diseases*, vol. 12, n° 6, p. 887–93.
- Otero M., Schweigmann N., Solari H. G. (2008, juillet). A Stochastic Spatial Dynamical Model for *Aedes Aegypti*. *Bulletin of Mathematical Biology*, vol. 70, n° 5, p. 1297–1325.
- Souza D. R. de, Tomé T., Pinho S. T. R., Barreto F. R., Oliveira M. J. de. (2013, janvier). Stochastic dynamics of dengue epidemics. *Physical Review E*, vol. 87, n° 1.
- Tran A., Raffy M. (2006, février). On the dynamics of dengue epidemics from large-scale information. *Theoretical Population Biology*, vol. 69, n° 1, p. 3–12.
- Treuil J.-P., Drogoul A., Perrier E. (2008). *Modélisation et simulation à base d'agents* (Dunod éd.).
- Tsunoda T., Cuong T. C., Dong T. D., Yen N. T., Le N. H., Phong T. V. *et al.* (2014). Winter refuge for *aedes aegypti* and *ae. albopictus* mosquitoes in hanoi during winter. *PloS one*, vol. 9, n° 4, p. e95606.
- Vezzani D., Velázquez S. M., Schweigmann N. (2004). Seasonal pattern of abundance of *aedes aegypti* (diptera: Culicidae) in buenos aires city, argentina. *Memórias do Instituto Oswaldo Cruz*, vol. 99, n° 4, p. 351–356.
- Voogt J. A., Oke T. R. (2003). Thermal remote sensing of urban climates. *Remote sensing of environment*, vol. 86, n° 3, p. 370–384.
- Wee L. K., Weng S. N., Raduan N., Wah S. K., Ming W. H., Shi C. H. *et al.* (2013). Relationship between rainfall and *aedes* larval population at two insular sites in pulau ketam, selangor, malaysia. *Southeast Asian Journal of Tropical Medicine and Public Health*, vol. 44, n° 2, p. 157.
- Wesolowski A., Qureshi T., Boni M. F., Sundsøy P. R., Johansson M. A., Rasheed S. B. *et al.* (2015). Impact of human mobility on the emergence of dengue epidemics in pakistan. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 112, n° 38, p. 11887–11892.
- Williams C. R., Johnson P. H., Long S. A., Rapley L. P., Ritchie S. A. (2008, novembre). Rapid Estimation of *Aedes aegypti* Population Size Using Simulation Modeling, with a Novel Approach to Calibration and Field Validation. *Journal of Medical Entomology*, vol. 45, n° 6, p. 1173–1179.