



HAL
open science

Génération d'environnements artificiels pour la simulation spatiale d'arboviroses en milieu urbain : application à la dengue et au virus Zika

Renaud Misslin, Éric Daudé

► To cite this version:

Renaud Misslin, Éric Daudé. Génération d'environnements artificiels pour la simulation spatiale d'arboviroses en milieu urbain : application à la dengue et au virus Zika. Colloque SAGéo, Dec 2016, Nice, France. pp.389-402. halshs-02194160

HAL Id: halshs-02194160

<https://shs.hal.science/halshs-02194160>

Submitted on 25 Jul 2019

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.

Génération d'environnements artificiels pour la simulation spatiale d'arboviroses en milieu urbain : application à la dengue et au virus Zika

Misslin R.¹, Daudé É.¹

1. UMR-6266 IDEES, Université de Rouen
5 rue Thomas Beckett, 76821CEDEX Mont-Saint-Aignan, France
renaud.misslin1@univ-rouen.fr, eric.daude@univ-rouen.fr

RESUME. *Aedes aegypti* est le principal vecteur de la dengue et du virus Zika. Avec la recherche vaccinale, le contrôle vectoriel est un levier important de lutte contre ces maladies. Étudier les relations dynamiques et non-linéaires entre l'environnement et le vecteur permet de guider les stratégies de surveillance et de contrôle. L'objectif de MODE (Model of Dynamical Environment) est d'identifier, par la simulation, les contextes environnementaux qui influencent la distribution spatiotemporelle d'*Aedes aegypti* en milieu urbain. Cet article présente (1) le concept d'un « habitat basé sur les ressources » et son adaptation à *Aedes aegypti*, (2) les méthodes génériques d'estimation des facteurs environnementaux de cet habitat et (3) les dynamiques de ces facteurs. Ces concepts et méthodes sont illustrés en (4) par une application sur Bangkok (Thaïlande). Nous concluons par une discussion sur l'apport d'une modélisation d'environnements dynamiques pour l'étude des arboviroses.

ABSTRACT. *Aedes aegypti* is the main vector of dengue and Zika virus. Along with vaccine research, vector control is a major lever for fighting these diseases. Studying dynamical and non-linear relationships between the environment and vectors provides guidance for monitoring and control strategies. MODE's (Model of Dynamical Environment) objective is to identify environmental dynamics that contribute to the spatiotemporal distribution of *Aedes aegypti* in urban areas. This paper presents (1) the resource-based habitat concept and its application to *Aedes aegypti*, (2) the generic methods for estimating the environmental factor of this habitat and (3) the factors dynamics. These concepts and methods are illustrated in (4) with an application on Bangkok, Thailand. We conclude with a discussion on the contribution of environmental dynamics modelling for the study of arboviruses.

MOTS-CLES : *maladies à transmission vectorielle, resource-based habitat concept, biogéographie, simulation spatiale, SIG, télédétection, simulation à base d'agents*

KEYWORDS: *vector-borne disease, resource-based habitat concept, biogeography, spatial simulation, GIS, remote sensing, agent-based simulation*

SAGEO'2016 – Nice, 6-9 décembre 2016

1. Introduction

Aedes aegypti est un moustique présent dans les zones tropicales et intertropicales d'Afrique, d'Amérique et d'Asie. Il est le vecteur principal de la dengue, du virus Zika et, dans une moindre mesure, du Chikungunya et de la fièvre jaune. Sa nature synanthropique (Rodhain et Rosen, 1997) font des villes les principales zones de propagation de ces maladies. Constat accablant de l'OMS (2016), la propagation de ces virus, notamment de Zika, est le résultat de l'abandon depuis les années 1970 des politiques de contrôle des moustiques dans de nombreux pays¹. Si à moyen terme les vaccins contribueront au recul de ces maladies, les mesures anti-vectorielles restent d'ici là le moyen de contrôle principal. Celles-ci consistent à agir sur l'environnement dans le but (a) d'empêcher le développement des moustiques (nettoyage, drainage et destruction des gîtes larvaires potentiels), (b) de réduire les populations (traitements chimiques des gîtes, fumigation, introduction de prédateurs ou de mâles stériles) et (c) de limiter les interactions entre hôtes et vecteurs (utilisation de moustiquaires). L'amélioration des moyens de surveillance des aires de distribution des vecteurs en milieu urbain et péri-urbain doit permettre d'optimiser l'utilisation de ces moyens dans le temps et l'espace (Gubler, 2002).

Les facteurs qui influencent le développement de populations d'*Ae. aegypti* sont inégalement distribués dans les espaces urbains et leur présence évolue dans le temps. La variété de combinaisons de ces facteurs rend alors difficile la mise en évidence de causalités simples qui permettraient d'expliquer et d'estimer les densités vectorielles. Les précipitations, par exemple, sont relativement homogènes en milieu urbain. De ce fait, elles ne permettent pas d'expliquer la présence de *hotspots* de moustiques, marqueurs d'une distribution spatiale hétérogène.

Devant la difficulté de réaliser sur le terrain des mesures de cette diversité et l'incapacité des expériences de laboratoire à la reproduire, la simulation informatique, plus particulièrement la simulation à base d'agents, apparait comme une alternative intéressante à ces obstacles. Notre objectif est de modéliser le moustique *Aedes aegypti* dans un environnement réaliste pour étudier, par le biais de la simulation, divers scénarios telles que les conditions de croissance d'une population de moustiques ou les effets de diverses techniques de lutte anti-vectorielle. Plusieurs modèles à base d'agents ont été développés pour explorer le comportement du moustique *Aedes* (Almeida *et al.*, 2010 ; Cummins *et al.*, 2012). Dans ces modèles les relations vecteur-environnement sont explorées dans un contexte micro-local qui ne permet pas la généralisation directe des connaissances à l'échelle urbaine. Or, ce sont ces dernières qui permettent de guider les campagnes de lutte anti-vectorielle dans la ville. D'autres auteurs proposent une approche à base d'agents où les moustiques, les hôtes et l'environnement sont modélisés à résolution fine et simulés à l'échelle urbaine (Daudé *et al.*, 2015 ; Karl *et al.*, 2014). Le modèle MOMA (Maneerat et Daudé, 2016a), développé en parallèle du modèle présenté

¹ <http://who.int/dg/speeches/2016/wha-69/en/>

SAGEO'2016 – Nice, 6-9 décembre 2016

dans le cadre de cet article, intègre par exemple un environnement hétérogène et dynamique, construit à partir de données collectées sur le terrain dans un quartier de Delhi (Inde) (Maneerat et Daudé, 2016b). La collecte de données est cependant une contrainte si l'on veut couvrir une vaste zone ou appliquer le modèle sur un autre territoire. C'est là la limite que MODE (*Model of Dynamical Environment*) propose de pallier : son objectif est de proposer un cadre de modélisation pour générer des environnements dynamiques, spatialement représentatifs des zones d'études.

MODE est développé dans le cadre du projet DENFREE (FP7). Sa conception implique des épidémiologistes et des entomologistes de l'Institut Pasteur intégrés au projet. Il s'agit d'un modèle générique, transposable d'une zone urbaine à une autre, tout en étant spécialisé pour la modélisation d'*Ae. aegypti*. Ce modèle a été conçu comme le support environnemental dynamique avec lequel interagissent des moustiques et des hôtes. Il peut également être utilisé pour produire des cartes détaillées des niches écologiques potentielles d'*Ae. aegypti* à différentes périodes de l'année, et ainsi orienter les opérations de lutte anti-vectorielle (ex : suivi plus régulier des populations de moustiques ou mise en place de systèmes de lutte anti-vectorielle participative dans les espaces les plus attractifs pour les moustiques).

Nous présentons dans un premier temps le concept de l'habitat basé sur les ressources (*ressource-based habitat*) qui permet de définir l'ensemble des actions et interactions possibles entre *Ae. aegypti* et l'environnement. Dans un second temps, nous présentons les 5 étapes de construction du modèle MODE permettant de générer différents contextes environnementaux et leurs évolutions. Une troisième section est consacrée à une application de MODE à Bangkok (Thaïlande).

2. Concept de l'habitat-basé sur les ressources appliqué à *Aedes aegypti*

Le *Resource-Based Habitat Concept* (RBHC) (Dennis *et al.*, 2003), utilisé en biologie de la conservation, consiste à se baser sur les besoins primaires d'un organisme pour en déduire son habitat fonctionnel ou sa niche écologique potentielle. Elle a été portée dans le champ de la prédiction du risque d'occurrence des maladies à vecteur par (Hartemink *et al.*, 2015). Selon ces auteurs, l'approche RBHC permet de dépasser les limites des modèles inductifs basés sur les relations statistiques mesurées entre des variables environnementales observées et la présence d'un vecteur ou d'un agent pathogène, ainsi que les limites des modèles déductifs constitués d'équations ne tenant pas compte du caractère spatial du phénomène modélisé. Dans le champ des maladies à transmission vectorielles, le RBHC permettrait de reconstruire les espaces potentiels de transmission du virus en rassemblant les espaces fonctionnels des vecteurs et des hôtes. Avec MODE, nous nous concentrons sur la construction d'un modèle dynamique de l'environnement pour le moustique vecteur de la dengue. Il s'agit donc de mettre en relation les caractères perceptifs de ce moustique et les ressources ou conditions qui influent son développement biologique et ses comportements. Sur la base de la classification proposée par Hartemink *et al.* (2015), les éléments de l'environnement perceptibles par *Ae. aegypti* peuvent en effet être séparés en deux catégories. D'une part les ressources qui représentent l'ensemble des éléments environnementaux qui sont

Génération d'environnements artificiels

consommables par le moustique (ex : nectar, sang). D'autre part les conditions qui représentent l'ensemble des états de l'environnement qui influencent le moustique dans son comportement (présence de gîtes de ponte) ou dans son fonctionnement biologique (température).

Ces ressources et conditions varient au cours de la vie d'*Ae. aegypti*. Son cycle de vie est divisé en 4 stades, de la phase aquatique (œuf, larve et nymphe) à la phase aérienne (adulte). Au cours de sa phase aquatique, les conditions de l'eau (qualité chimique et température) ont un impact important sur la survie et la durée de développement du moustique. Une fois adulte, celui-ci est capable de se déplacer, de se reproduire, de se nourrir de nectar et, pour les femelles, de prendre des repas sanguins. Les protéines contenues dans le sang permettent à cette dernière de porter ses œufs à maturité. Au cours de son cycle gonotrophique (cycle repas sanguin – maturation des œufs – ponte), elle dédie une grande partie de son temps au repos dans des lieux frais et ombragés (Vezzani *et al.*, 2005). La ponte se fait dans un élément de l'environnement contenant (ou susceptible de contenir) de l'eau. Il peut tout aussi bien s'agir d'un objet créé par l'homme (un pot de fleur) que d'un objet dont l'existence est liée à la végétation (creux dans un arbre). Par la suite nous désignerons par « gîte larvaire potentiel » (GLP) ces types d'éléments environnementaux. En milieu urbain, les GLP liés aux activités humaines peuvent être très nombreux. Ils sont un facteur primordial de la prolifération des populations d'*Ae. aegypti* dans les villes (Arunachalam *et al.*, 2010).

Si l'importance des différentes ressources et conditions pour *Aedes* varie au cours de sa vie, celle-ci est en partie déterminée par ce qu'il est capable de percevoir à chaque stade de développement. La perception d'*Ae. aegypti* adulte est limitée à une trentaine de mètres environ (Gillies et Wilkies, 1972). Il dispose de capacités olfactives, visuelles, tactiles, chimio-taxiques, thermo-sensorielles et photo-sensorielles. Celles-ci lui permettent d'identifier ou de réagir selon son état à la présence de certains éléments environnementaux : l'humain, l'eau, le nectar des plantes, la lumière, l'humidité et la température. Les relations entre les caractères perceptifs du moustique à l'état pré-adulte et adulte et les objets (conditions et ressources) sur lesquels ils portent permettent ainsi de définir les types de données qui devront être mobilisées pour décrire ces relations. Par exemple, au stade adulte, le moustique peut percevoir des gîtes en eau ou susceptibles de contenir de l'eau lorsqu'il a besoin de pondre. Cinq facteurs environnementaux locaux ont ainsi été définis comme faisant partie du RHBC d'*Aedes* : l'eau (liée aux précipitations ou aux activités humaines), les températures, la végétation, la présence humaine et les gîtes de ponte. Nous décrivons dans la section 3 les méthodes d'évaluation de ces facteurs et les modèles de leurs dynamiques.

3. MODE : Model Of Dynamical Environment

MODE est un modèle à base d'agents où chaque agent représente une unité de base de l'environnement. Celle-ci est décrite par des attributs qui représentent les ressources et conditions du RBHC d'*Ae. aegypti*. Elle dispose également de

SAGEO'2016 – Nice, 6-9 décembre 2016

méthodes qui décrivent les dynamiques de mise en eau des gîtes et la variation des températures (Figure 1).

La résolution spatiale d'une cellule est de 30 m sur 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 et Daudé, 2016a). Cette résolution est utilisée dans d'autres modèles de simulation (Karl *et al.*, 2014).

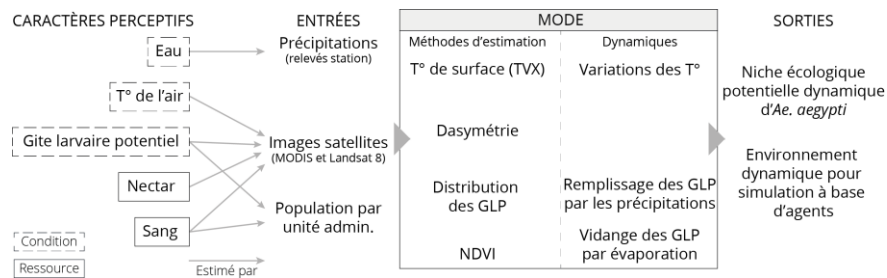


FIGURE 1. Fonctionnement général de MODE : des caractères perceptifs à la niche écologique potentielle dynamique d'*Ae. aegypti*

3.1. Méthode d'estimation des ressources et des conditions

De façon générale, les méthodes d'estimation des caractéristiques environnementales intégrées à MODE sont développées dans le but de pouvoir être appliquées à différentes zones urbaines. Les images satellites, entrées majeures du modèle, 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. Bien que l'utilisation d'images haute résolution ne soit pas nécessaire au bon fonctionnement de MODE, celles-ci constituent une perspective intéressante (ces données restant toutefois très coûteuses). Par ailleurs, les données sur le recensement, les précipitations et les températures peuvent être acquises librement ou auprès d'autorités locales.

3.1.1. L'eau : un élément essentiel du cycle de vie d'*Ae. aegypti*

La présence d'eau est une condition *sine qua non* de la présence de moustiques. Dans les zones colonisées par *Ae. aegypti* soumises à un climat de mousson, la saison des pluies correspond à la période de prolifération maximale des moustiques. Les données de précipitation utilisées dans MODE sont issues de relevés par station météorologique en accès libre dans la plupart des cas. Ces données correspondent à la quantité (mm) de précipitations enregistrées par station et par jour. Les systèmes de stockage d'eau constituent une seconde opportunité pour le développement du

Génération d'environnements artificiels

moustique. Ces systèmes peuvent être liés à l'absence de réseau d'adduction d'eau ou aux pratiques culturelles telles que l'arrosage des fleurs.

3.1.2. La température de l'air : les zones de confort d'*Aedes aegypti*

La température de l'air influence les dynamiques biologiques du moustique et du virus (Lambrechts *et al.*, 2011), mais aussi le comportement des hôtes (utilisation de climatiseurs et vie à l'intérieur ou l'extérieur). De nombreuses études soulignent les relations qu'elles entretiennent avec les épidémies de dengue (*e.g.* Descloux *et al.*, 2012 ; Hopp *et al.*, 2003). Les températures locales évoluent durant la journée selon de nombreux facteurs dont le principal est le mode d'occupation du sol (Misslin *et al.*, 2016). Dans le cadre de MODE, les données de température de l'air (T_a) sont estimées à partir d'images MODIS de température de surface (LST). Cette dernière exprime la chaleur émise par la surface terrestre et diffère de quelques degrés par rapport à la T_a . Cependant, grâce à une méthode appelée *temperature-vegetation index* (TVX), les fortes corrélations entre la LST et la T_a et entre la couverture végétale et la T_a permettent d'estimer cette dernière lorsque des relevés météorologiques issus de stations sont disponibles. La méthode TVX est utilisée et décrite par plusieurs auteurs (*e.g.* Vancustem *et al.*, 2010 ; Zhu *et al.*, 2013). Les données de température résultant de l'estimation de la T_a sont affectées aux cellules environnement. Cette température évolue en fonction des relevés de LST MODIS (MOD11A1 ou MYD11A1). Lorsque ceux-ci sont disponibles, la température de la cellule environnement prend la valeur qui lui correspond. Lorsque les conditions nuageuses ne permettent pas l'acquisition d'images de LST, la T_a de la station météorologique la plus proche est affectée à la cellule environnement en question.

3.1.3. La végétation : les zones refuges productrices de nectar

Aedes aegypti peut être attiré par les zones végétalisées pour se reposer, pour pondre ou lorsqu'il recherche du nectar pour se nourrir. Les espaces végétalisés proches des espaces bâtis sont des espaces très producteurs de moustiques (Vezzani *et al.*, 2005). Pour évaluer la présence de ces espaces à une résolution fine, nous utilisons le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) (Tucker, 1979). Cet indice de végétation est couramment utilisé en télédétection. Il est calculé à partir des bandes rouge et infrarouge d'une image satellite (Landsat 8). Les résultats sont compris entre -1 et 1. Les valeurs négatives indiquent généralement une absence de végétation. Une valeur de 1 indique une forte présence de végétation.

3.3.4. Les densités humaines : les possibilités de repas sanguin

Les densités humaines représentent des stocks de sang pour le moustique. Il s'agit d'un élément essentiel pour son cycle gonotrophique. MODE estime ces densités au lieu de résidence, le rôle de la mobilité des hôtes dans la propagation des épidémies n'est donc pas abordé ici. Le niveau d'agrégation des données de recensement des populations pose une première difficulté : dans MODE les cellules-environnements sont définies à une résolution de 30 m sur 30 m alors que les données de recensement sont souvent agrégées sur des unités administratives de

SAGEO'2016 – Nice, 6-9 décembre 2016

plusieurs km². La cartographie dasymétrique permet de résoudre ce premier problème (Yuan, 1997). Elle est principalement utilisée pour affiner des données démographiques en les redistribuant d'une échelle large à une échelle plus fine, cette dernière étant définie par rapport à des données satellites (images brutes, occupation du sol, température de surface, indices spectraux ...). La méthode de cartographie dasymétrique est décrite dans plusieurs publications (Li et Weng, 2010). Schématiquement la méthode revient à ventiler les données de populations (nombre d'habitants et nombre de ménages dans MODE) au lieu de résidence fourni à un échelon administratif dans des zones bâti qui occupent cet échelon administratif. Dans le cadre de MODE, ces données satellites sont extraites d'une image satellite Landsat 8. La classification d'occupation du sol est obtenue en appliquant une classification non-supervisée ISODATA.

3.3.5. Les gîtes larvaires potentiels : les lieux de ponte

La présence de GLP est une donnée difficile à estimer : il est pratiquement impossible de la mesurer de façon directe à partir d'images satellite (Moloney *et al.*, 1998) et il est coûteux de collecter cette donnée sur le terrain. En effet, de nombreuses études ont montré qu'*Ae. aegypti* pond de manière préférentielle dans des petits gîtes domiciliaires ou péri-domiciliaires contenant de l'eau fraîche et stagnante. La répartition de ces gîtes dans l'espace urbain est très largement liée à la présence des hommes et à leurs activités (Ooi *et al.*, 2006). Karl *et al.* (2014) proposent d'utiliser le nombre de ménages et la végétation pour estimer la présence de gîtes larvaires dans l'environnement en construisant un *breeding site abundance index* (indice d'abondance de GLP). Notre démarche s'en inspire, le nombre de gîtes potentiels dans une cellule environnement est une valeur de stock estimée en partant de l'hypothèse que les ménages en sont les principaux producteurs (les cellules environnement associées à de l'eau ne produisent pas de GLP) :

$$Gpotint_i = D_i \cdot \alpha_i \cdot \Delta \quad (1)$$

$$Gpotext_i = \mu_i + (D_i \cdot \alpha_i)(1 - \Delta) + D_{j(i)} \cdot \beta_{j(i)} \quad (2)$$

$$Gpottot_i = Gpotint_i + Gpotext_i \quad (3)$$

Dans l'ensemble d'équations précédant, i désigne une cellule environnement, $j(i)$ désigne les cellules voisines d'ordre 1 de la cellule i , i_{occsol} correspond à l'occupation du sol de i (classification non-supervisée réalisée sur une image Landsat 8), $Gpotext_i$ correspond au nombre de GLP situés à l'extérieur d'un bâtiment dans i , $Gpotint_i$ est le nombre de GLP situés à l'intérieur d'un bâtiment dans i , $Gpottot_i$ désigne le nombre de GLP total dans i et D_i correspond au nombre de ménages de i . Quatre paramètres sont utilisés dans ces équations : μ_i correspond au nombre de GLP de i produits quel que soit le nombre ménages habitants i (entier aléatoire), il permet de générer des gîtes dans des cellules de type végétalisé par exemple ; α_i représente le nombre de GLP créés dans i par un ménage habitant i , Δ_i représente la part des gîtes intérieurs parmi les GLP créés par les ménages habitant i ($0 < \Delta < 1$) et $\beta_{j(i)}$ correspond au nombre de GLP créés dans i par les ménages habitant j .

Génération d'environnements artificiels

Les paramètres μ , α et β sont des entiers dont la valeur est issue d'une loi de Poisson avec une espérance mathématique λ fixée par l'utilisateur. Cette valeur dépend du contexte local. Ces paramètres indiquent en moyenne et en écart-type le nombre de GLP que l'on trouve par unité de surface dans des espaces non-bâties (μ), par unité de ménage dans les espaces bâtis (α) et par densité de voisinage (β). La production de GLP par ménage est ici homogène. Un critère de discrimination, selon le statut économique des ménages par exemple, pourrait être introduit.

MODE simule les dynamiques des deux stocks GLP intérieurs et extérieurs de chaque cellule à partir de deux processus : le remplissage naturel (pluie) ou artificiel (arrosage/climatiseur/collecte d'eau) et la vidange (évaporation ou manuelle).

Le remplissage s'effectue différemment selon la situation du gîte (intérieur d'un bâtiment / extérieur). Les gîtes intérieurs sont remplis par les hommes. Ils ont une contenance maximale et une contenance minimale (en mm) fixées par l'utilisateur. La hauteur d'eau initiale du stock de gîtes intérieurs est donnée par tirage aléatoire dans une loi uniforme entre 0 et 1. Lorsque le niveau d'eau atteint la contenance minimale, celui-ci est rempli jusqu'à la limite de sa contenance maximale. Le stock de gîtes extérieurs est rempli par les précipitations. Si un stock de gîtes situés à l'extérieur atteint sa contenance maximale et reçoit encore de l'eau via les précipitations, celui-ci déborde.

La vidange des gîtes s'effectue par évaporation pour les gîtes intérieurs et les gîtes extérieurs. Celle-ci est calculée à l'échelle de la ville grâce à l'équation de Linacre (1977) qui prend notamment en entrée les horaires de lever et de coucher du soleil, la température de l'air et les coordonnées géographiques. Les gîtes intérieurs peuvent également être vidés par consommation d'eau. Le rythme de la consommation peut-être définie par le modélisateur selon différentes stratégies : par exemple, chaque jour une certaine proportion des gîtes est vidée. Seuls les GLP intérieurs sont à nouveau remplis lorsqu'ils atteignent leur contenance minimale.

Ces dynamiques de remplissage et de vidange des gîtes larvaires potentiels, à l'intérieur comme à l'extérieur, permettent de prendre en compte les processus menant à l'accumulation de l'eau durant plusieurs jours consécutifs, ce qui favorise potentiellement la mise en eau des œufs et le développement du moustique. Elles permettent également de prendre en compte le débordement des gîtes situés à l'extérieur, ce qui entraîne potentiellement la perte d'une partie de la population de larves des gîtes actifs. Enfin, elles permettent de prendre en compte la présence de gîtes en dehors de la saison des pluies du fait des usages humains.

4. Application de MODE à Bangkok (Thaïlande)

La zone d'expérimentation choisie est la ville de Bangkok (Thaïlande) située dans la zone intertropicale (13°45'22"N, 100°30'06"E). Son climat est tropical avec une saison sèche (5 à 44 mm de précipitations) de novembre à mars et une saison humide (160 à 342 mm de précipitations) d'avril à octobre. Les températures sont

SAGEO'2016 – Nice, 6-9 décembre 2016

comprises entre 26 et 30°C (moyenne de 28°C). La ville de Bangkok compte 8,2 millions individus (recensement NSO 2010²) pour un territoire administratif de 1568 km². Celui-ci présente une grande diversité en termes de densité de population et d'occupation du sol. *Aedes aegypti* est détecté tout au long de l'année avec un minimum durant la saison sèche et un maximum au cours de la mousson.

Le logiciel R (3.1.3) a été utilisé pour constituer les jeux de données. MODE est développé sous GAMA (1.7). Les images de télédétection utilisées sont issues du satellite Landsat 8 OLI (datant du 17/01/2014) et des satellites MODIS Aqua et Terra (MYD11A1 et MOD11A1, deux images par jour entre 2009-2011). Ces dernières sont téléchargées et prétraitées par le biais du package R MRTtools). Les données démographiques proviennent du recensement de 2010 (BMA 2010 Census). Enfin, les données météorologiques sont accessibles librement sur le site web du Thai Meteorological Department³. Elles ont été acquises pour la période 2009-2012.

4.1 Les précipitations : données météorologiques

Les données de précipitations sont issues d'une station météorologique située au centre de Bangkok. Elles sont collectées pour la période 2009-2012. Ces données sont à la base des dynamiques de remplissage des gîtes larvaires potentiels situés à l'extérieur des bâtiments (Figure 3).

4.2. Température de l'air : estimation par la méthode TVX

Le satellite AQUA survole Bangkok aux alentours de 2h00 et 14h00 (heure locale). Le satellite TERRA passe aux alentours de 10h30 et 22h30. Les images issues du premier satellite sont donc plus à même d'estimer les températures minimales et maximales journalières à Bangkok. Celles-ci sont estimées pour la période 2009-2011 et pour une zone plus large que la BMA afin d'augmenter le nombre de stations de référence dont les données permettent d'appliquer la méthode TVX. Sur cette zone élargie, 19,8% des images MYD11A1 nocturnes et 17,6% des images MYDD11A1 diurnes contiennent au moins la moitié de pixels valides. Ces images sont converties en température de surface puis la température de l'air est estimée. Au total, la température de l'air est estimée pour 217 images thermales nocturnes et 193 images thermales diurnes. La Figure 2a présente un exemple de distribution spatiale de la température de l'air (températures minimales nocturnes au 20/01/2009).

Les données de température de l'air étant fournies à une résolution plus grande que la taille des cellules environnement, ces dernières prennent la valeur de Ta du pixel de 1 x 1 km sur lequel elles se trouvent. Les données de Ta ne sont pas disponibles lorsque la couverture nuageuse est trop importante, durant la mousson

² <http://popcensus.nso.go.th/upload/census-report-6-4-54-en.pdf>

³ <http://www.tmd.go.th/en/climate.php>

notamment. Si la Ta d'un pixel n'est pas renseignée, MODE attribue la Ta mesurée par la station la plus proche géographiquement pour chaque cellule environnement.

4.3. Végétation : estimation par le NDVI

Le NDVI est calculé à partir des bandes rouge et infrarouge de l'image Landsat 8. Les valeurs du NDVI (Figure 2b) varient de -0,32 à 0,82. Les valeurs inférieures à 0 ont été rehaussées à 0. Elles correspondent à l'absence totale de végétation. Bangkok apparaît globalement comme un territoire présentant une couverture végétale importante, notamment dans la périphérie rurale (champs végétalisés). Au centre de Bangkok, les espaces végétalisés sont plus fragmentés. Ils correspondent essentiellement à des parcs et des jardins. Les axes de transport apparaissent distinctement de par les zones de bâti dense qui les bordent. Les données issues du NDVI seront utilisées comme une ressource pour le moustique *Aedes* et considérées comme statiques, la dynamique végétale n'ayant à priori que peu d'impact, en tout cas non renseigné, sur les dynamiques de population vectorielle.

4.4. Densité de population et de ménages : estimation par la cartographie dasymétrique

Les données d'occupation du sol sont extraites de l'image Landsat 8. Deux classes de bâti principales ont été identifiées : bâti dense (correspondant au centre-ville de Bangkok) et bâti lâche (correspondant à la périphérie de la ville), sans distinction quant à leur usage ou leur fonction. Les populations sont ventilées dans ces classes d'occupation du sol potentiellement habitables à partir de la méthode de cartographie dasymétrique (Figure 2c). Cette méthode permet d'estimer la répartition des populations à une échelle plus fine que l'échelle du *Kwaeng* (unité administrative de référence du recensement du NSO dont la superficie est comprise entre 0,15 et 73,92 km²). Les densités estimées les plus fortes sont localisées principalement dans le centre de la ville, à l'Est du fleuve Chao Phraya qui la traverse. Le tissu urbain est très dense tout en comportant quelques zones inhabitées et végétalisées. Dans les espaces périphériques de l'Est et de l'Ouest, les densités les plus fortes sont réparties le long des axes routiers importants. Une grande part de la périphérie Ouest présente un tissu urbain lâche aux densités de populations faibles.

4.5. Gîtes larvaires potentiels : estimation de leur distribution spatiale

Le nombre de ménages par cellule environnement calculé par la méthode dasymétrique est un paramètre essentiel au calcul du nombre de gîtes larvaires potentiels (GLP) par cellule (équation 1). Les zones en eau (canaux, rizières, étangs) sont les seules dans lesquelles il n'est *a priori* pas possible de trouver de GLP. Les paramètres $\lambda\mu=4$, $\lambda\alpha=6$, $\lambda\beta=3$ utilisés à Bangkok donnent une moyenne de 17,8 gîtes/cellule et un écart-type de 28,5 sur l'ensemble de la ville (min.=0, Q1=4, méd.=8, Q3=17, max.=452). L'analyse de sensibilité a montré que le nombre de GLP moyen global varie très peu d'une simulation à l'autre en fixant les valeurs de

SAGEO'2016 – Nice, 6-9 décembre 2016

μ , α et β . À titre d'exemple, pour 100 simulations réalisées avec les valeurs de paramètres ci-dessus, l'écart-type du nombre de GLP moyen produits au cours des simulations ne dépasse pas 0,01.

Les zones les plus pourvues sont principalement situées au centre-ville et dans les espaces d'habitat pavillonnaire situés aux alentours de celui-ci. Les valeurs minimales, moins de 10 gites, se trouvent dans les cellules végétalisées et éloignées des zones habitées, comme dans la périphérie Est et la périphérie Ouest, ou dans des zones urbaines bâties mais peu denses, telle que le Kwaeng de Phra Borom Maha Ratchawang (partie Ouest de l'encart de la Figure 2d) et rassemblant le palais royal, des temples et des ministères.

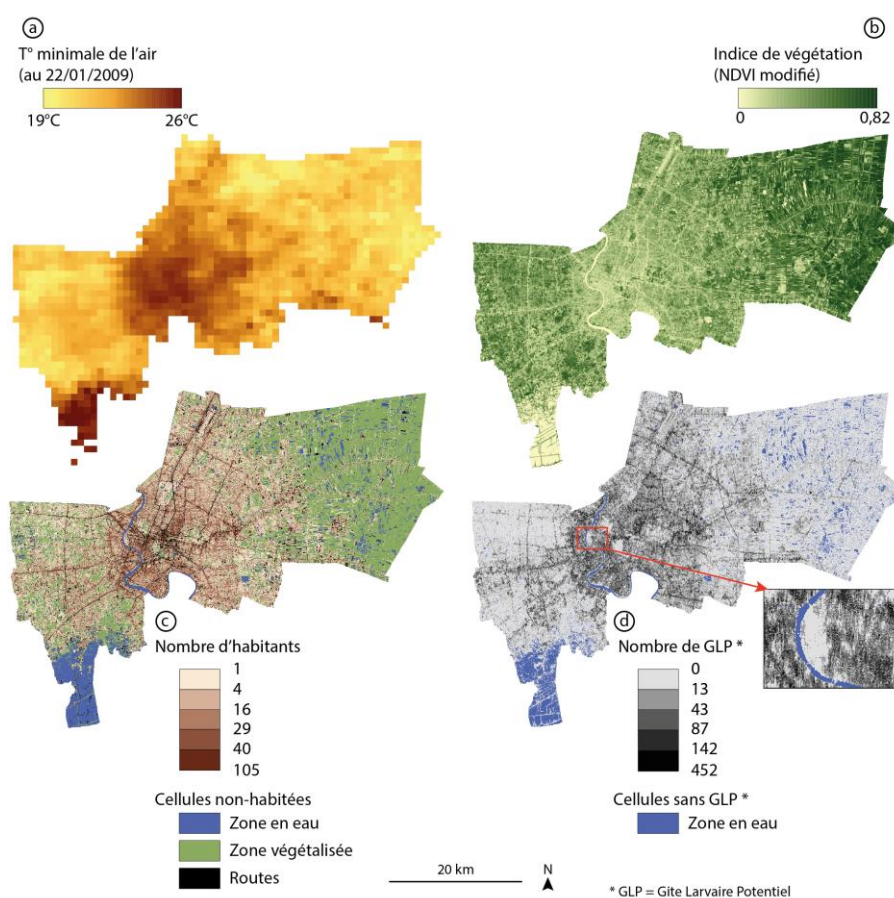


FIGURE 2. Estimation des ressources et des conditions pour *Ae. aegypti* à Bangkok

5. Discussion et conclusion

La méthode définie précédemment permet de quantifier pour chaque cellule environnement 4 attributs environnementaux : le NDVI, le nombre d'habitants, le nombre de gîtes (intérieurs et extérieurs) et la température de l'air. Un cinquième attribut, les précipitations, est fourni globalement en entrée du modèle de remplissage des gîtes potentiels. Parmi ces attributs, deux sont dynamiques : les températures et les précipitations. Ceux-ci agissent directement sur le taux de remplissage des gîtes et la température de l'eau. La Figure 3a représente par exemple la dynamique en eau d'un stock de gîtes situés à l'extérieur. Le phénomène d'accumulation d'eau peut être comparé aux précipitations ponctuelles enregistrées. La possibilité de simuler l'accumulation et l'évaporation est fondamentale pour l'interaction avec le modèle moustique (MOMA). En l'absence de données entomologiques, cette dynamique de disponibilité de gîtes en eau peut être comparée à la distribution temporelle de l'incidence hebdomadaire de la dengue à Bangkok en 2012 (Figure 3b). La forme des deux distributions est similaire. Elles présentent un décalage d'un mois environ qui peut s'expliquer par le temps d'accès des œufs au stade adulte et par le cycle d'infection. Ceci est un résultat encourageant d'un point de vue macroscopique.

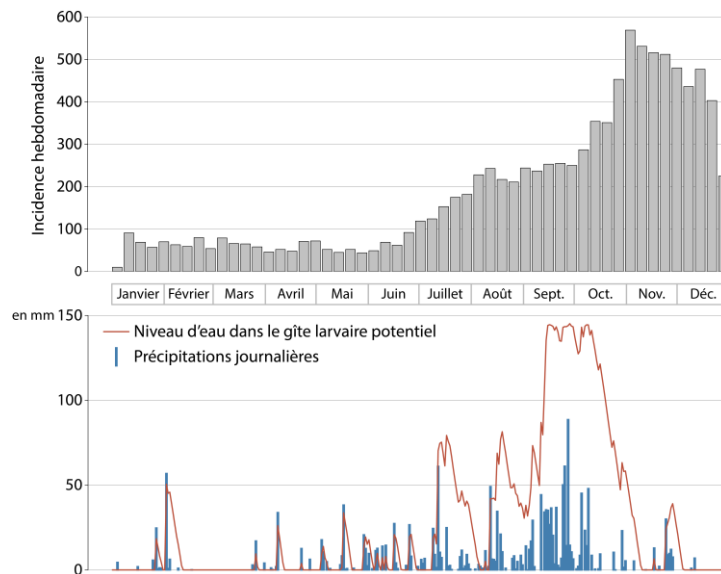


FIGURE 3. Incidence hebdomadaire de dengue, précipitations et évolution simulée du niveau d'eau dans un GLP extérieur de 150 mm de hauteur à Bangkok (2012)

MODE est construit dans l'objectif de pouvoir être transposé d'une ville à une autre. Le fait qu'il soit construit à partir de données libres ou accessibles dans la plupart des villes en font un modèle relativement souple et générique. À court terme,

SAGEO'2016 – Nice, 6-9 décembre 2016

MODE sera couplé au modèle moustique MOMA (Maneerat et Daudé, 2016a) afin de simuler les dynamiques de stocks de moustiques à l'échelle d'une ville, données entomologiques difficiles à obtenir sur le terrain.

Remerciements :

Cet article a été écrit dans le cadre du projet DENFREE (Dengue Research Framework for Resisting Epidemics in Europe, grant agreement : 282 378), septième programme de la Commission européenne (FP7). Les auteurs remercient leurs partenaires Alexandre Cebeillac, Bertrand Lefebvre, Somsakun Maneerat, Patrick Taillandier, Yvette Vaguet, Alain Vaguet (Université de Rouen), Olivier Telle et Richard Paul (Institut Pasteur). Les auteurs remercient également les relecteurs pour l'ensemble de leurs suggestions.

Bibliographie

- Almeida S. (de), Ferreira R., Eirasc Á., Obermayr R., Geier M. (2010). Multi-agent modeling and simulation of an *Aedes aegypti* mosquito population. *Environmental Modelling & Software*, vol. 25, n° 12, p.1490-1507.
- Arunachalam N., Tana S., Espino F., Kittayapong P., Abeyewickreme W., Wai K., Tyagi B., Kroeger A., Sommerfeld J., Petzold M. (2010). Eco-bio-social determinants of dengue vector breeding: a multicountry study in urban and periurban Asia. *Bulletin of the World Health Organization*, vol. 88, n° 3, p. 173-184.
- Bhatti S., Tripathi N. (2014). Built-up area extraction using Landsat 8 OLI imagery. *GIScience & Remote Sensing*, vol. 51, n° 4, p. 445-467.
- Cummins B., Cortez R., Foppa I., Walbeck J., Hyman J. (2012). A spatial model of mosquito host-seeking behavior. *PLoS Computational Biology*, vol. 8, n° 5, e1002500.
- Daudé É., Vaguet A., Paul R. (2015). La dengue, maladie complexe. *Natures Sciences Sociétés*, vol. 23, n° 4, p. 331-342.
- Dennis R. (2003). Towards a functional resource-based concept for habitat: a butterfly biology viewpoint. *Forum*, vol. 102, n° 2, p. 417-426.
- Descloux É., Mangeas M., Menkes C., Lengaigne M., Leroy A., Tehei T., Guillaumot L., Teurlai M., Gourinat A., Benzler J., Pfannstiel A., Grangeon J., Degallier N., Lamballerie X. (de) (2012). Climate-based models for understanding and forecasting dengue epidemics. *PLoS neglected tropical diseases*, vol. 6, n° 2, e1470.
- Getis A., Morrison A., Gray K., Scott T. (2003). Characteristics of the spatial pattern of the dengue vector, *Aedes aegypti*, in Iquitos, Peru. *The American journal of tropical medicine and hygiene*, vol. 69, n° 5, p. 494-505.
- Gillies M.T., Wilkes T.J. (1972). The range of attraction of animal baits and carbon dioxide for mosquitoes. Studies in a freshwater area of West Africa. *Bull Entomol Res*, vol. 61, p. 389-404.
- Hartemink N., Vanwambeke S., Purse B., Gilbert M., van Dyck H. (2015). Towards a Resource-based habitat approach for spatial modelling of vector-borne disease risks. *Biological Reviews*, vol. 90, n° 4, p. 1151-1562.

Génération d'environnements artificiels

- Hopp M., Foley J (2003). Worldwide fluctuations in dengue fever cases related to climate variability. *Climate Research*, vol. 25, p. 85-94.
- Karl S., Halder N., Kelso J., Ritchie S., Milne G. (2014). A spatial simulation model for dengue virus infection in urban areas. *BMC Infectious Diseases*, vol. 14, n° 1, p. 447-464.
- Lambrechts L., Paaijmans K., Fansiri T., Carrington L., Kramer L., Thomas M., Thomas, Scott T. (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*, vol. 108, n° 18, p. 7460-7465.
- Li G., Weng Q. (2010). Fine-scale population estimation: how Landsat ETM+ imagery can improve population distribution mapping. *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 36, n° 3, p. 155-165.
- Linacre, E. (1977). A simple formula for estimating evaporation rates in various climates, using temperature data alone. *Agricultural Meteorology*, vol. 18, p. 409-424.
- Maneerat S., Daudé É. (2016a). 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.
- Maneerat S., Daudé É. (2016b). 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. *Cybergéo : Européen Journal of Geography*. [en cours d'évaluation]
- Misslin R., Telle O., Daudé É, Vaguet A., Paul R. (2016). Urban Climate versus global climate change – What makes the difference for dengue?. *Annals of the New York Academy of Science*. [à paraître].
- Moloney J., Skelly C., Weinstein P., Maguire M., Ritchie S. (1998). Domestic aedes aegypti breeding site surveillance: limitations of remote sensing as a predictive surveillance tool. *The American journal of tropical medicine and hygiene*, vol. 59, n° 2, p. 261-264.
- Ooi E., Goh K., Gubler D (2006). Dengue prevention and 35 years of vector control in Singapore. *Emerging infectious diseases*, vol. 12, n° 6, p. 887-893.
- Rodhain, F., Rosen, L. (1997). Mosquito vectors and dengue virus–vector relationships. *Dengue and Dengue Hemorrhagic Fever*. New York, CAB International, p. 45-60.
- Tucker, C. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, vol. 8, p. 127-150.
- Vancutsem C., Ceccato P., Dinku T., Connor S. (2010). Evaluation of MODIS land surface temperature data to estimate air temperature in different ecosystems over Africa. *Remote Sensing of Environment*, vol. 114, n° 2, p. 449-465.
- Vezzani D., Rubio A., Velázquez S., Schweigmann N., Wiegand T. (2005). Detailed assessment of microhabitat suitability for *Aedes aegypti* (Diptera: Culicidae) in Buenos Aires, Argentina. *Acta Tropica*, vol. 95, n° 2, p. 123-131.
- Zhu W., Lu A., Jia S. (2013). Estimation of daily maximum and minimum air temperature using MODIS land surface temperature products. *Remote Sensing of Environment*, vol. 130, p. 62-73.