

CONDITIONS CLIMATIQUES ET PROBABILITES DE PRESENCE DE MOUSTIQUES, VECTEURS DE MALADIES *

Alexandre Eyraud-Griffet ¹, Jennifer Pradel, Karine Chalvet-Monfray et Dominique J. Bicout

RESUME

Il est désormais avéré que notre planète est soumise à un changement climatique global, très probablement dû aux activités anthropiques récentes, qui se poursuivra selon toute probabilité au XXI^e siècle. Ce changement aura un impact sur la distribution spatiale des êtres vivants et, plus particulièrement, les insectes vecteurs de maladies. Par conséquent, des territoires jusqu'à ce jour exempts de maladies vectorielles seront susceptibles d'être atteints. Dans cette étude nous nous sommes intéressés plus particulièrement à deux zones humides françaises : la Camargue et la Dombes. L'objectif de ce travail est d'estimer la potentialité de ces zones à constituer des lieux favorables au développement de *Culex modestus*, moustique vecteur du virus West Nile en Camargue. Pour ce faire, nous avons utilisé des données climatiques issues du modèle Arpège-Climat (scénario B2) désagrégé à 15 km pour caractériser l'évolution du climat dans les deux zones, et calculé des indices entomo-climatiques pour analyser la relation climat et dynamique de population de *Cx. modestus*. Pour les trois périodes de temps « passé » (1951-1980), « présent » (1991-2020) et « futur » (2031-2060), nous avons mis en évidence une hausse conséquente des températures moyennes entre le passé et le futur (+ 2,54°C en Dombes et + 2,07°C en Camargue) ainsi qu'une modification de la répartition annuelle des pluies qui résulteraient en une augmentation du nombre de périodes favorables à *Cx. modestus*.

Mots-clés : Climat, moustiques, modélisation, Camargue, Dombes.

SUMMARY

It is now generally agreed that our planet is experiencing a global climate change mainly due to recently increasing human activities. It is highly likely that the XXIst century will suffer from many climatic upheavals that may have a serious impact on the spatial distribution of living beings, especially insects, vectors of diseases. As a consequence, some territories still free of vector-borne diseases may get exposed in the future. In this study we focus on two French wetland areas, the Camargue and the Dombes and we attempt to determine whether these areas may become sites for the reproduction and development of *Culex modestus*, a mosquito vector of the West Nile virus in Camargue. To this end, data on climate from the Arpege-Climat model downscaled to 15 km were used for characterization of climate changes in the areas under study. Entomo-climatic indices were calculated for analysis of the relationship between climate and population dynamics of *Cx. modestus*. It appears that, for three time periods, past (1951–1980), present (1991–2020) and future (2031–2060), a significant rise in mean temperature can be expected, as well as a change in the distribution of rainfall over the year which may result in a significant increase in the number of periods favorable to *Cx.modestus*

Keywords: Climate, Mosquitoes, Modelling, Camargue, Dombes.



* Texte de la communication orale présentée au cours des Journées scientifiques AEEMA-AESA, 4-5 juin 2009
¹ Biomathématiques et Epidémiologie, Equipe EPSP, TIMC-IMAG, UMR 5525 CNRS UJF, Ecole nationale vétérinaire de Lyon, 1 Avenue Bourgelat, 69280 Marcy l'Etoile, France
 Contacts : alexandre.eyraud-griffet@orange.fr ; d.bicout@vet-lyon.fr

I - INTRODUCTION

Il est désormais avéré que notre planète connaît un changement climatique global [GIEC, 2007], très probablement dû aux activités humaines (agriculture, industrie, déforestation, ...) qui sont à l'origine de rejets importants de gaz à effet de serre (CO₂, CH₄, N₂O,...), modifiant ainsi les concentrations atmosphériques de ces gaz depuis 1750. En 2007, dans son 4^{ème} rapport de synthèse sur les changements climatiques, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) mentionne que ces changements se manifestent, entre autres, par un réchauffement du climat sans équivoque. En effet, on observe à l'échelle de la planète une augmentation des températures moyennes de l'atmosphère et des océans, avec pour conséquence une fonte massive des neiges et des glaces ainsi qu'une élévation du niveau moyen de la mer. Entre 1906 et 2005, la hausse des températures moyennes observées à l'échelle du globe est estimée à 0,74°C. Cette augmentation apparaît plus importante dans l'hémisphère Nord et pour les hautes latitudes. Localement, ces perturbations climatiques peuvent avoir des impacts plus ou moins importants sur les écosystèmes [Bates *et al.*, 2008 ; GIEC, 2007]. En modélisant le système climatique, le GIEC prédit les évolutions climatiques possibles en se fondant sur différents scénarios de production de gaz à effet de serre [Nakicenovic *et al.*, 2000]. Le XXI^{ème} siècle connaîtra probablement un bouleversement climatique qui aura un impact non négligeable sur la distribution spatiale, l'abondance et la dynamique saisonnière (phénologie) des êtres vivants [Doney *et al.*, 2006, Figuerola, 2007; Chuine *et al.*, 2004; Tawnsend *et al.*, 2008].

Les impacts du changement climatique sur les maladies vectorielles sont controversés. Certains auteurs prédisent une extension des maladies vectorielles dans le monde, en particulier dans les zones aujourd'hui tempérées et en altitude et en latitude en marge des zones endémiques [Epstein *et al.* 2001 ; Martens *et al.* 1995]. D'autres indiquent que les preuves de tels impacts sur les maladies vectorielles n'ont pas été apportées pour la plupart. En effet, selon eux, l'apparition des maladies vectorielles est principalement due à des facteurs anthropiques, liés au transport, au niveau socioéconomique, à l'immunité des populations, etc. [Reiter, 2009 ; Rogers & Randolph, 2006 ; Van der Weijden, 2007]. De nombreux travaux ont permis de

mieux comprendre le fonctionnement des populations de vecteurs ainsi que la circulation des maladies associées [Bicout *et al.*, 2004 ; Reiter, 2001 ; Reiter 2009 ; Rubel *et al.*, 2008]. L'étude des populations de moustiques potentiellement vecteurs est un préalable majeur dans l'évaluation du risque d'occurrence de maladies vectorielles [Wu *et al.*, 2007]. De plus, prévoir l'évolution des populations de vecteurs permet de mettre en œuvre des moyens de lutte et de prévention adaptés.

En France, le virus West Nile (WN) circule régulièrement sur le littoral méditerranéen. Les premiers cas humains et équins avaient été identifiés en Camargue au début des années 1960 [Mouchet *et al.*, 1970]. Cette maladie a ré-émergé dans la population équine de Camargue en 2000, puis en 2004 [Balenghien *et al.*, 2007]. *Culex modestus* (Ficalbi) (Diptera : Culicidae) est le principal vecteur du virus WN dans les zones humides de Camargue [Mouchet *et al.*, 1970 ; Balenghien *et al.*, 2007]. Cette espèce pullule depuis l'extension de la riziculture et l'évolution des pesticides [Ponçon *et al.*, 2007]. Également présente en Dombes dans les années 70 [Pichot, 1978], *Cx. modestus* semble avoir proliféré depuis une trentaine d'années sans que les causes aient été identifiées [Pradel *et al.*, 2008]. Des études récentes semblent également démontrer une extension de cette espèce dans les écosystèmes de type étang en Europe Centrale [Votypka *et al.*, 2008].

Cette étude s'inscrit dans le contexte de changement climatique et de ses impacts sur la population de vecteurs. Nous nous intéressons à deux zones humides françaises que sont la Camargue et la Dombes, afin de déterminer leur potentialité à constituer des lieux favorables au développement de *Culex modestus*. Pour ce faire, nous utilisons des données climatiques issues du modèle Arpège-Climat sur trois périodes de temps : passé (1951–1980), présent (1991–2020) et futur (2031–2060). Pour chacune de ces périodes et pour nos deux zones, nous analysons l'évolution des températures et précipitations, et calculons deux indices entomo-climatiques, liés aux températures (WTSI) et aux précipitations (WRSI), qui mettent en évidence des écarts aux normales et pourraient permettre de déterminer les périodes favorables à *Cx. modestus* [Pradel *et al.*, 2009].

II - MATERIELS & METHODES

1. MATERIELS

1.1. ZONES D'ETUDE

La Camargue

Zone humide de 145 300 ha située dans le Sud de la France, entre les deux bras principaux du delta du Rhône et la Mer Méditerranée. Cette région s'étend à l'Est jusqu'à la plaine de la Crau, à l'Ouest jusqu'à Aigues-Mortes et au Nord jusqu'à Beaucaire. Cette région est composée de deux parties : la zone sèche, au nord ouest avec des terres agricoles et la zone humide, au sud, composée de marais et de plans d'eau salée. Cette région, exceptionnelle pour sa faune et sa flore, bénéficie du statut de Réserve naturelle nationale (sur 13 117 hectares depuis 1927) et de Parc Naturel Régional (sur 30 000 hectares, depuis 1970). Les principales activités humaines sont l'élevage des chevaux et de taureaux, la culture du riz et l'exploitation du sel. L'évaporation annuelle étant plus importante que l'apport d'eau par les pluies. Pour maintenir le niveau des rizières quasi constant, l'homme intervient en prélevant l'eau dans le fleuve, évitant ainsi à la région d'être brûlée par le sel.

La Dombes

Plateau argileux d'environ 12 000 ha situé dans le département de l'Ain, au nord-est de Lyon. Elle est limitée à l'Ouest par la vallée de la Saône, au Sud par la Côtère qui surplombe les plaines du Rhône, à l'est par la rivière d'Ain et au Nord par la Bresse. Mosaïque de zones humides, elle comporte près de 1 400 étangs piscicoles, artificiels, creusés dès le XI^{ème} siècle par des moines. Le plateau a une faible déclivité avec une pente assez faible de l'ordre de 2%, et les étangs sont alimentés en eau essentiellement par les précipitations. Comme en Camargue, l'homme gère l'eau grâce à des systèmes de vannes et fossés permettant d'acheminer l'eau d'un étang à un autre. L'eau s'écoule lentement et régulièrement lors des vidanges annuelles à l'occasion de la pêche ou pour le contrôle du niveau d'eau des étangs aval. Il existe un gradient croissant de précipitations de l'Ouest vers l'Est, dû au massif montagneux du Jura. L'alternance de périodes de mise en eau et d'assèchement est une particularité culturelle et culturale locale, où culture céréalière (1 an) et élevage du

poisson (3 ans) sont exécutés en alternance selon un mode d'assolement triennal.

La Camargue et la Dombes sont toutes deux caractérisées par de grandes étendues d'eau et une diversité de zones humides qui offrent des gîtes favorables à de nombreuses espèces de moustiques.

1.2. BIOLOGIE DE *CULEX MODESTUS*

Culex modestus est une espèce de la famille des *Culicidae* que l'on trouve dans toute l'Europe (paléarctique), et abondante sur le pourtour méditerranéen. En Camargue, les adultes de *Cx. modestus* sortent de diapause généralement en mars avec, en mars-avril, un premier pic d'agressivité attribué aux femelles sortant d'hibernation qui prennent leur repas de sang, puis pondent. On observe un creux apparent de population en avril-mai lorsque les femelles hibernantes meurent tandis que la première génération de l'année est encore en cours de développement. Cette première génération d'adultes apparaît à partir de juin puis les générations se succèdent avec un développement continu de l'espèce. La fin de l'été marque le pic de population suivi d'une diminution de population pendant l'automne. Les jeunes femelles fécondées entrent en diapause et passent l'hiver à l'abri dans les roseaux ou autre végétation dense qui bordent les étangs [Mouchet *et al.*, 1969]. Pendant la diapause, les femelles peuvent reprendre une activité (vol, piqûre) lorsque la température s'élève au dessus de 10 à 15°C [Mouchet *et al.*, 1969], de même que l'agressivité des femelles augmente lorsque la température dépasse 12°C pendant la période d'activité [Chalvet-Monfray *et al.*, 2007].

En Camargue, *Culex modestus* se développe dans des gîtes naturels (les roselières bordant les étangs) et artificiels (les rizières). Les gîtes naturels sont colonisés en début de printemps, et lorsque le niveau d'eau dans les étangs diminue à partir de juin, dû à l'augmentation de l'évapotranspiration, les roselières s'assèchent et les femelles colonisent alors les rizières. En Dombes, la population de *Cx. modestus* dépend exclusivement des étangs [Pichot, 1978]. La répartition et les quantités de précipitation sont donc très importantes pour assurer le bon remplissage des étangs et le maintien de la disponibilité des gîtes.

1.3. DONNEES

1.3.1. Issues des modèles climatiques

Les données climatiques utilisées sont des sorties du modèle ARPEGE-climat (111 km de résolution, scénario B2 du GIEC) de Météo-France, désagrégées à résolution de 15 km sur la Camargue et la Dombes (figure 1), par le Centre européen de recherche et de formation avancée en calcul scientifique (CERFACS) [Pagé *et al.*, 2008]. La désagrégation par des méthodes statistiques prend en compte les reliefs et permet ainsi une étude du climat à une échelle plus fine d'une région géographiquement restreinte. Ces données ont été obtenues dans le cadre du projet Analyse des changements climatiques et de ses impacts sur l'eau et la santé (ACCIES). Les

paramètres utilisés dans ce travail sont les données quotidiennes de températures minimales (Tmin), maximales (Tmax), moyennes (Tmoy) et les précipitations (RR) pour la période 1950–2099.

1.3.2. Issues de stations météorologiques

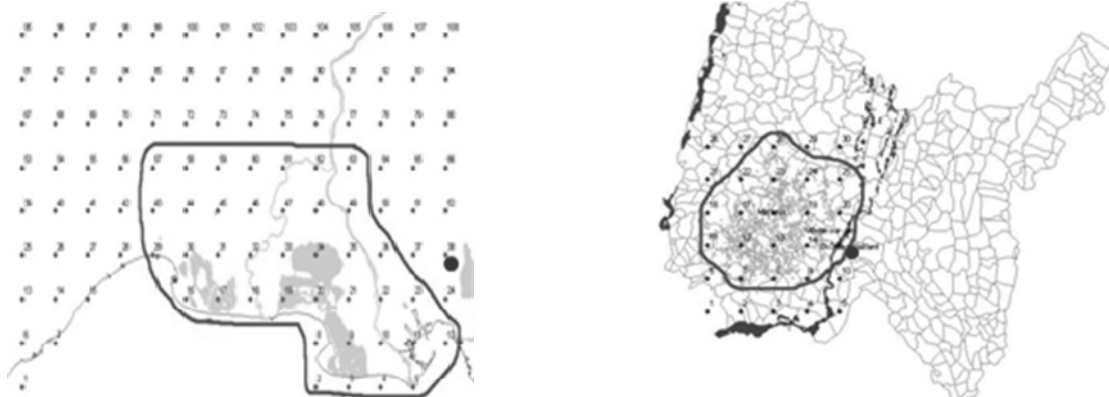
Données quotidiennes de Tmin, Tmax, RR sur la période 1951–1980 issues des stations Météo-France d'Istres (pour la Camargue) et Ambérieu-en-Bugey (pour la Dombes) (seules stations à disposer de mesures depuis 1950 pour les paramètres qui nous intéressent). Ces données ont été acquises par le biais de la climathèque.

Figure 1

Localisation des mailles du modèle étudiées en Camargue (gauche) et en Dombes (droite)

Chaque intersection de maille constitue un point du modèle ou « station » où est calculée l'évolution de chaque paramètre du modèle. En tout, 42 et 18 stations ont été retenues pour l'étude en Camargue et en Dombes respectivement (inclues dans les zones délimitées par les traits épais).

Les observations météorologiques proviennent des stations Météo-France d'Istres en Camargue et d'Ambérieu en Dombes (représentées par le gros point)



2. METHODES

2.1. ETUDE CLIMATIQUE

Nous avons considéré trois périodes de trente ans chacune espacées de 11 ans : passé (1951–1980) ; présent (1991–2020) ; futur (2031–2060). Dans chaque région et pour chaque période, les valeurs normales de chaque paramètre ont été calculées, en

moyennant les données sur 30 ans et sur l'ensemble des stations. Les données simulées ont été comparées aux observations de Météo-France pour la période « passé » dans chaque région afin de valider le modèle dans chaque zone.

2.2. INDICES ENTOMO-CLIMATIQUES

Nous avons utilisé deux indices entomo-climatiques qui ont été définis à partir de la connaissance de l'influence des conditions météorologiques sur la biologie de *Cx. modestus*, en Dombes [Pradel *et al.*, 2009]. Inspiré de Davies *et al.* (1985), le premier indice, WRSI (*Weighted Rainfall Surplus Index*) est lié aux précipitations et met en évidence des périodes de précipitations importantes et persistantes (WRSI positif). Le second, WTSI (*Weighted Temperature Surplus Index*) est lié aux températures. Un WTSI positif souligne des périodes durant lesquelles la température est supérieure à la normale et avec un grand nombre de jours favorables à l'activité de *Cx. modestus* (lorsque $T_{moy} \geq 12^\circ\text{C}$ d'après Chalvet-Monfray *et al.*, 2007) [Pradel *et al.*, 2009]. Nous avons donc repris les formules de ces indices pour les calculer pendant la période d'activité de *Cx. modestus*, c'est-à-dire entre mars et octobre. WRSI et WTSI ont été construits de la manière suivante : soit i correspondant au numéro du mois tel que $i = 3, 4, \dots, 10$ (où 3 = mars, 4 = avril, etc.) et j correspondant à l'année (par exemple $j = 1951, 1952, \dots, 1980$ pour le passé). Pour WRSI nous définissons par n_{ij} le nombre de jours de pluie tel que $RR \geq 1 \text{ mm/j}$ et par r_{ij} le cumul de précipitations du mois i de l'année j ; n_i et r_i traduisent les valeurs normales du nombre de jours de pluie et du cumul mensuel de précipitation du mois i de la période de référence « passée ». De la même manière, pour WTSI nous définissons par m_{ij} le nombre de jours où $T_{moy} \geq 12^\circ\text{C}$ et par T_{mij} la température moyenne mensuelle du mois i pour l'année j ; t_i et m_i représentent respectivement la valeur normale de température moyenne mensuelle et le nombre de jours durant lesquels $T_{moy} \geq 12^\circ\text{C}$ pour la même période de référence passée.

Les indices sont ensuite construits selon les cinq étapes suivantes :

1. Précipitations (températures) mensuelles pondérées pour chaque année :

$$R_{ij} = n_{ij} \times r_{ij} \quad (T_{ij} = m_{ij} \times T_{mij})$$

2. Précipitations (températures) mensuelles pondérées normales :

$$R_i = n_i \times r_i \quad (T_i = m_i \times T_{mi})$$

3. Surplus de précipitations (températures) pour chaque mois de mars à octobre :

$$Y_{ij} = R_{ij} - R_i \quad (Z_{ij} = T_{ij} - T_i)$$

4. Surplus de précipitations (températures) pondéré pour chaque mois de mars à octobre :

$$RS_{ij} = Y_{ij} \times n_{ij} \quad (TS_{ij} = Z_{ij} \times m_{ij})$$

5. Indice du surplus pondéré de précipitations (températures) pour chaque mois de mars à octobre (cumul sur huit mois) :

$$WRSI_{kj} = \sum_{i=1}^k RS_{ij} \quad (WTSI_{kj} = \sum_{i=1}^k TS_{ij})$$

avec $1 \leq k \leq 8$.

Il apparaît que des indices de température et de précipitations simultanément positifs indiquent des conditions météorologiques favorables au développement des populations en Dombes [Pradel *et al.*, 2009]. En effet, un WRSI >0 indiquerait la présence d'eau en quantité suffisante pour immerger les ceintures de végétation des étangs en Dombes, donc des habitats disponibles pour la ponte et le développement [Pradel *et al.*, 2009], et un indice WTSI >0 indiquerait des périodes favorables à l'activité des adultes [Pradel *et al.*, 2009]. Sur la base de ceci, nous cherchons à déterminer les périodes potentiellement favorables à ce moustique, du point de vue uniquement climatique, pour le passé, le présent et le futur, en Camargue et en Dombes.

2.3. LOGICIELS UTILISES

Le traitement des données a été réalisé avec le logiciel R version 2.1.3.

III - RESULTATS

1. CARACTERISATION DES CLIMATS

1.1. VALIDATION DU MODELE : COMPARAISON OBSERVATIONS - MODELES

1.1.1. Températures

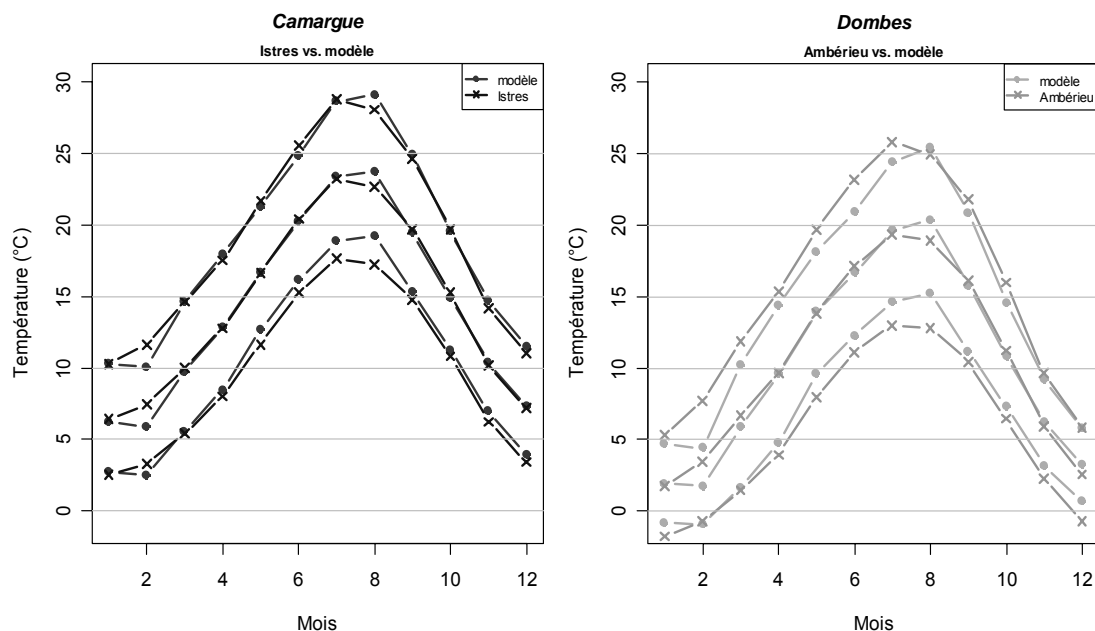
La comparaison entre les sorties du modèle et les observations sur la période « passé » pour chaque zone est représentée sur la figure 2 pour Tmax, Tmoy et Tmin. Dans les deux zones d'étude, les deux courbes de Tmoy sont

quasiment superposées, bien que le modèle sous-estime légèrement les températures de février et surestime celles d'août. Le modèle a tendance à sous-estimer les Tmax (sauf en août) et à surestimer les Tmin (sauf en février). En comparant les températures annuelles des deux régions, on remarque une différence d'environ 4°C.

Figure 2

Comparaison des températures modèle/observations (1951-1980)

De bas en haut : Tmin, Tmoy et Tmax.



1.1.2. Précipitations

En Camargue, la répartition des précipitations prédites par le modèle est très proche de celle observée. En revanche, le cumul mensuel est sous estimé par le modèle tous les mois, sauf en septembre et novembre où il est surestimé par le modèle (cf. figure 3). On peut néanmoins noter quelques points de discordance comme en décembre où les valeurs prédites sont inférieures aux observations. Le déficit de précipitation estival est moins marqué dans le modèle que dans la réalité. De même, le pic de précipitations automnales est moins marqué dans le modèle.

En Dombes, on observe des discordances entre le modèle et les observations, tant en termes de répartition que de cumuls de précipitations (cf. figure 3). Le modèle prédit deux pics de précipitations en mai-juin et octobre-novembre. Cette distribution ne rend pas bien compte de la réalité où le pic automnal est plus précoce et moins marqué. De plus, le modèle sous-estime la quantité de pluies hivernales. En revanche, entre avril et juillet, le modèle correspond bien aux observations. Les cumuls annuels de précipitation sont quant à eux très proches (environ 1 000 mm pour le modèle et 1 100 mm pour les observations). Ces différences

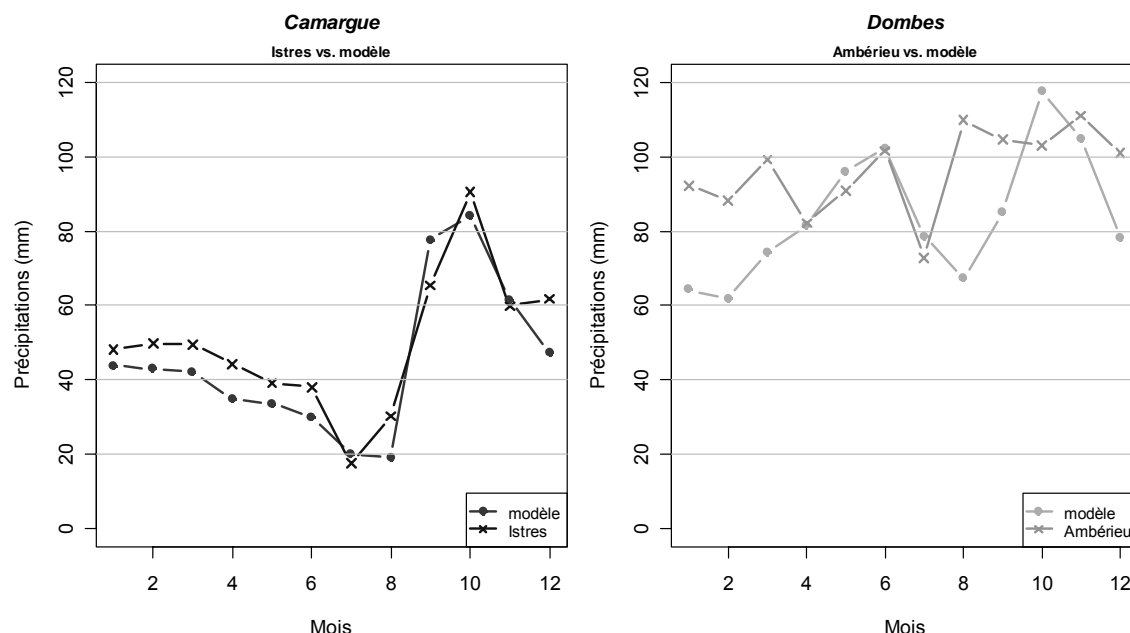
sont probablement dues à la localisation de la station météorologique dont sont issues les valeurs observées : à Ambérieu-en-Bugey, au sud-est de la Dombes, à la périphérie du maillage de « stations » (cf. figure 1). En raison du gradient croissant de précipitations Ouest-Est, Ambérieu reçoit plus de précipitations que la Dombes, mais la distribution reste très proche de celle de la Dombes.

De ce qui précède, on peut considérer que i) – pour les températures, le modèle reproduit globalement bien les observations dans les deux zones, ii) – pour les précipitations, le modèle est assez bon en Camargue (vue par

la station météo d'Istres), mais tend à sous-estimer les cumuls mensuels de précipitations, et quant à la Dombes (vue par la station météo d'Ambérieu-en-Bugey), le modèle n'est pas en accord avec les observations de la station. Ceci indique que les variations des précipitations se font sur des échelles spatiales plus grandes dans la Camargue que dans la Dombes. Et pour conclure du bon ou mauvais accord modèle – observations en Dombes, il faudrait faire la comparaison soit avec des observations faites dans la zone Dombes (figure 1) ou encore en prenant les données du modèle correspondant à la station météo d'Ambérieu-en-Bugey.

Figure 3

Comparaison des précipitations modèle/observations (1951-1980)



1.2. PREVISIONS DES MODELES CLIMATIQUES

1.2.1. Dombes

Températures

Entre le passé et le futur, la température moyenne annuelle passerait de 10,5°C à 13°C, connaissant ainsi une hausse de 2,53°C (figure 4). Les différences de Tmoy mensuelle sont plus importantes au premier semestre comparées au second. Ainsi, d'après le modèle, les hivers, printemps et débuts d'été s'échauffent plus que le reste de l'année. De plus, l'augmentation des Tmoy tend à s'accroître avec le temps (l'écart futur-présent est plus important que l'écart présent-passé).

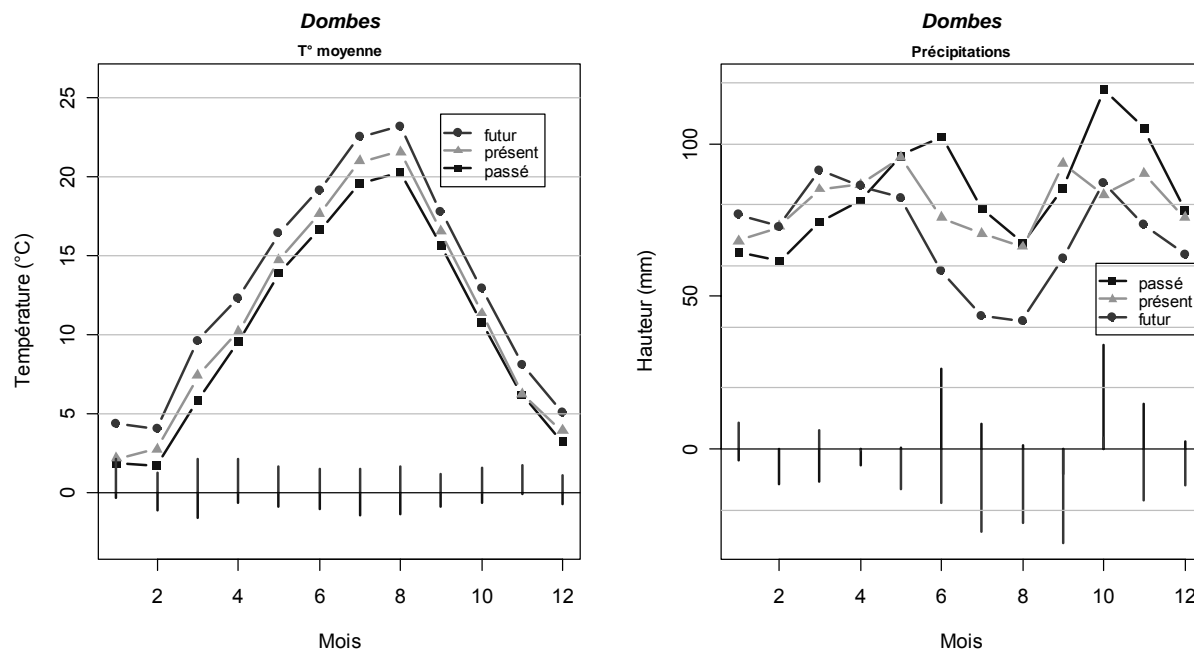
Précipitations

D'après le modèle, la répartition des pluies en Dombes reste globalement bimodale dans le futur : le pic d'octobre est conservé mais le premier pic de l'année serait plus précoce, passant de juin (« passé ») à mars (« futur »). Le fait le plus marquant est la baisse très significative des précipitations estivales et automnales, de l'ordre de 50%. Le cumul annuel de précipitation a diminué d'environ 250 mm entre passé et présent.

Figure 4

Evolution des températures moyennes mensuelles (gauche) et du cumul moyen mensuel de précipitation (droite) en Dombes

Les barres autour de la ligne zéro indiquent la différence par rapport au présent



1.2.2. Camargue

Températures

Entre le passé et le futur, la Tmoy augmenterait également de l'ordre de 2°C (figure 5). Comme pour la Dombes, la hausse est plus importante entre le présent et le futur qu'entre le passé et le présent. En revanche, cette augmentation touche de la même manière tous les mois, bien qu'elle soit un peu moins forte au second semestre.

Précipitations

Le rythme des précipitations en Camargue devrait quant à lui être profondément modifié. Entre le passé et le futur, le cumul annuel des précipitations diminuerait de 45 mm. La répartition des pluies change peu pendant l'année, sauf durant l'hiver. L'intensité et la durée de la période sèche estivale devraient considérablement augmenter (50% de pluie en moins et un mois de plus environ entre passé et futur). L'intensité du pic des pluies automnales diminuerait et un nouveau pic apparaîtrait en hiver. Dans le climat futur, il y

aurait deux pics de précipitations de même intensité en hiver et à l'automne.

2. RELATION CLIMAT - MOUSTIQUES

2.1. CALCUL DES INDICES A PARTIR DE DONNEES OBSERVEES ET MODELISEES, EN DOMBES

Pour avoir un référentiel de comparaison, les indices WTSI et WRSI ont été calculés en utilisant (i) les observations issues de la station météorologique de Marlieu, située au cœur de la Dombes, pour la période 1964 (début des premiers enregistrements) à 1993 et (ii) les données du modèle en considérant la même période, 1964–1993.

Nous nous sommes basés sur l'hypothèse de Pradel *et al.* (2009) selon laquelle des périodes caractérisées par des valeurs simultanément positives des deux indices indiquent des périodes favorables pour *Cx. modestus*. Pour chaque année, la proportion de mois favorables (i.e., nombre de mois pour lesquels WTSI > 0 et WRSI > 0 divisé par le nombre de mois de la période considérée : 8) (*cf.* figure 6 et tableau 1).

Figure 5

Evolution des températures moyennes mensuelles (gauche) et du cumul moyen mensuel de précipitation (droite) en Camargue

Les barres autour de la ligne zéro indiquent la différence par rapport au présent

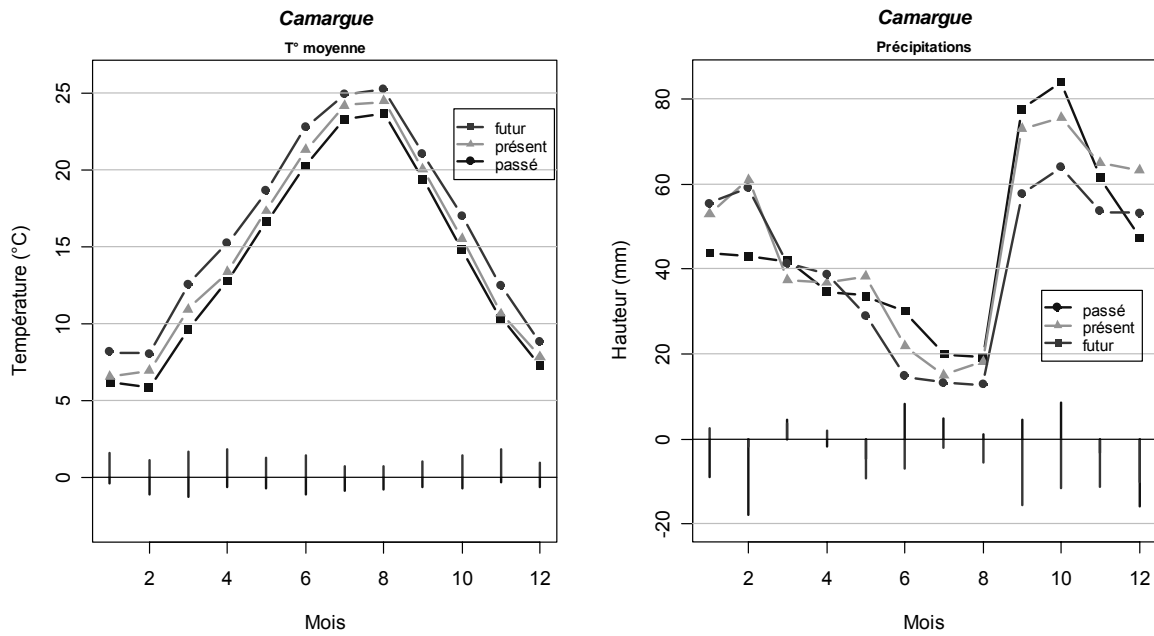


Figure 6

Proportion de mois favorables à *Cx. modestus*, sur la période de mars à Octobre, entre 1964 et 1993. A partir des observations (gauche) ; à partir des données du modèle (droite)

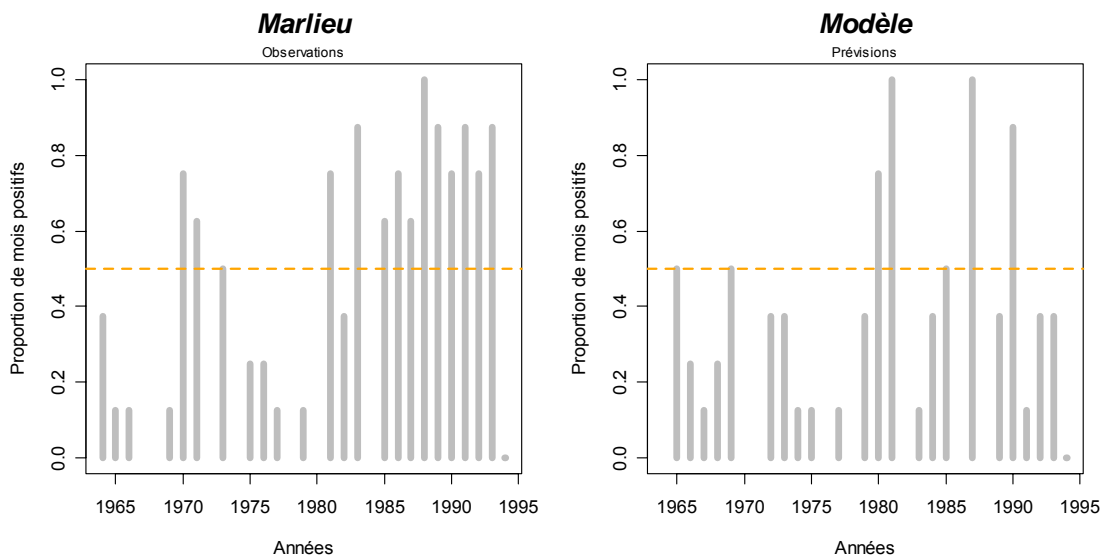


Tableau 1

Calcul des indices à partir de données observées (Marlieu) et modélisées (Modèle) sur la période de mars - octobre entre 1964 et 1993, soit 240 mois

MARLIEU				
	WRSI>0	WTSI>0	WRSI & WTSI>0	Nb. mois / saison
Nb. mois	170	140	100	3,33
Proportion	0,71	0,58	0,42	0.42
MODELE				
	WRSI>0	WTSI>0	WRSI & WTSI>0	Nb. mois / saison
Nb. mois	149	135	72	2,4
Proportion	0,62	0,56	0,30	0.33

Le modèle sous estime le nombre de mois favorables à *Cx. modestus* (72 mois) par rapport aux observations (100 mois). Sur une saison moyenne d'activité, un peu plus de trois mois sur huit seraient favorables à partir des observations, et deux mois et demi sur huit seraient favorables selon le modèle. Comme mentionné ci-dessus, ces différences viennent probablement du fait que le modèle et la station météo de Marlieu ne coïncident pas (géographiquement) en termes de précipitations.

2.2. EVOLUTION DES INDICES AU COURS DU TEMPS

Si les indices WTSI et WRSI sont utilisés pour déterminer les périodes favorables à *Cx. modestus* dans la Dombes, seul l'indice de température est utilisé pour la Camargue. En

effet, les précipitations ne sont pas un facteur limitant pour le développement de *Cx. modestus* dans cette région où les rizières, alimentées par les eaux du Rhône, constituent les principaux gîtes larvaires en été. Les résultats sont présentés dans le tableau 2. En Camargue, le nombre de mois pendant lesquels WTSI > 0 augmente sensiblement avec les périodes climatiques. Il en est de même en Dombes où le nombre de mois caractérisés par un WRSI > 0 augmente également, mais de manière moins marquée que les WTSI. Ainsi, la durée de la période favorable à *Cx. modestus* entre mars et octobre en Dombes augmenterait nettement, passant de un mois dans le passé, à près de six mois dans le futur. En Camargue, elle augmente également, d'environ un mois et demi pour le passé à près de huit mois dans le futur : soit l'ensemble de la saison d'activité de *Cx. modestus*.

Tableau 2

Evolution du nombre de mois présentant des indices positifs entre mars et octobre, en fonction de la période (passé, présent, futur) et de la région

Les nombres entre parenthèses indiquent la proportion de mois

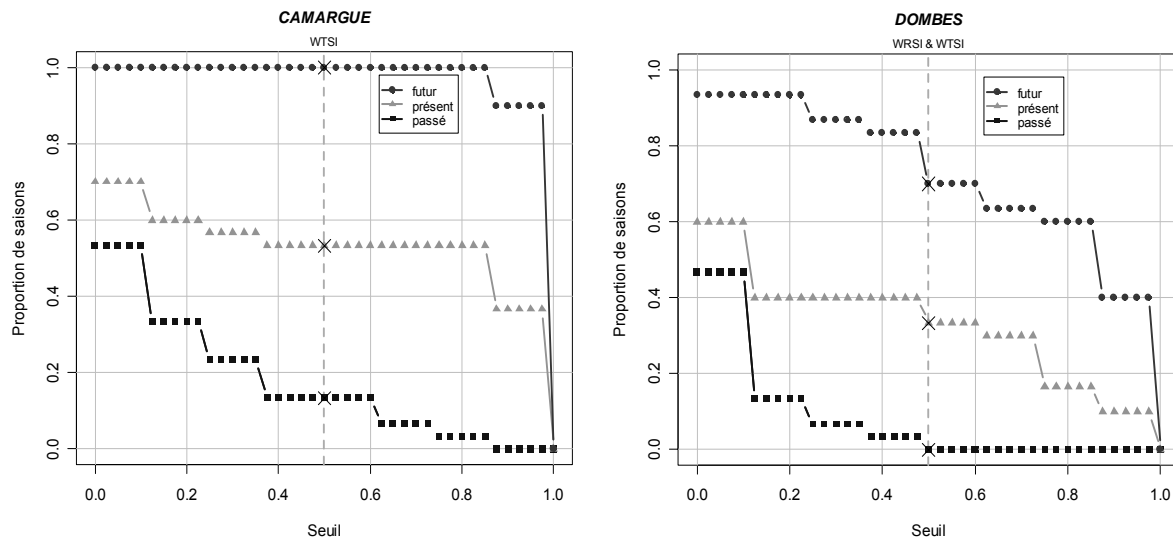
Dombes				Camargue	
	Nb. mois (proportion)			Nb. mois (proportion)	
Période	WRSI>0	WTSI>0	WRSI & WTSI>0	Période	WTSI>0
Passé	4,88 (0,61)	1,68 (0,21)	0,7 (0,09)	Passé	1,47 (0,18)
Présent	5,44 (0,68)	4,40 (0,55)	2,72 (0,34)	Présent	4,37 (0,55)
Futur	5,92 (0,74)	7,84 (0,98)	5,92 (0,74)	Futur	7,90 (0,99)

Nous supposons qu'une année est particulièrement favorable à *Cx. modestus* lorsque entre mars et octobre, au moins quatre mois sont favorables (proportion de mois favorables supérieure à 0.5). Nous avons ensuite calculé pour chaque zone, le nombre (proportion) d'années favorables pour chaque période « passé », « présent », « futur ». Les résultats sont présentés dans la figure 7. Ainsi, en Dombes, aucune année ne paraissait très

favorable dans la période passée. En revanche, la proportion d'années favorables augmente avec le temps : de près d'une année sur trois au temps présent à sept années sur 10 dans le futur. En Camargue, le nombre d'années favorables par période augmente également dans le temps : de moins de deux années sur 10 (13%) dans le passé, à plus d'une année sur deux (53%) actuellement et à toutes les années (100%) dans le futur.

Figure 7
Proportion d'années dont la période favorable est supérieure à différents seuils

Pour les trois périodes d'études, les courbes représentent la proportion d'années sur les 30 ans dont le nombre de mois favorables sur huit par année est supérieur à une valeur « seuil » allant de 0 à 1.



IV - DISCUSSION ET CONCLUSION

Nous avons mis en évidence l'augmentation du nombre de mois favorables à *Cx. modestus*, entre la période passée et future, en Camargue et en Dombes pendant la période mars – octobre (facteur 8,5 en Dombes et 5,3 en Camargue). De plus, le nombre d'années favorables, caractérisées par l'existence d'au moins quatre mois favorables sur huit, augmente au cours des périodes climatiques. Ainsi, en Dombes, près de deux années sur trois deviendraient favorables à *Cx. modestus* dans le futur, tandis qu'en Camargue toutes les années seraient favorables.

En Dombes, l'évolution des indices entomoclimatiques calculés à partir des sorties de modèles climatiques indiquerait une augmentation de la durée de la période

favorable à *Cx. modestus*. Cela pourrait se traduire par une extension de la durée de la saison d'activité et l'augmentation du nombre de générations annuelles de *Cx. modestus* et finalement, une augmentation de l'abondance des populations. Cependant, la température et les précipitations exercent aussi une influence sur la mortalité des individus à tous les stades et les populations de prédateurs naturels des moustiques. Il s'agit d'aspects importants qui n'ont pas été pris en compte dans notre analyse. En Dombes, les précipitations automnales et hivernales sont déterminantes pour le bon remplissage des étangs. Dans le futur, les précipitations hivernales seraient augmentées, tandis qu'elles diminueraient le reste de l'année. On peut penser qu'au moment de la sortie de diapause des femelles,

les ceintures de végétation des étangs seraient en eau, permettant aux premières générations de la population de se constituer. En revanche, le manque de précipitations et la hausse des températures particulièrement marqués en été, augmentera probablement l'évapotranspiration et l'exondation des ceintures de végétation. Paradoxalement, la proportion de périodes caractérisées par un indice WRSI >0 augmente légèrement au cours des périodes climatiques.

Ces résultats doivent cependant être pris avec beaucoup de précaution. En effet, ils se basent sur des indices qui ont été élaborés à partir d'un faible nombre d'observations [Pradel *et al.*, 2009]. Ceux-ci devraient être améliorés et validés avec un plus grand nombre d'observations. S'ils s'avéraient pertinents, ces indices pourraient être utilisés, comme illustré dans cet article, pour déterminer des périodes favorables au développement d'importantes populations de *Cx. modestus* à partir des seules données climatiques. Par ailleurs, *Cx. modestus* est inféodé, en Dombes, à l'écosystème des étangs et, en Camargue, aux étangs et rizières. Le maintien des activités agro-piscicoles dans les deux régions, et de la riziculture en Camargue, sont des composantes essentielles pour maintenir les populations. Dans ces deux zones humides artificielles, où l'homme est à l'origine d'une grande partie de la biodiversité, les facteurs humains influencent probablement les populations de manière plus importante que les facteurs climatiques. Ces aspects devraient donc être étudiés pour compléter l'étude de l'évolution des populations dans un contexte de changements environnementaux. En particulier, les impacts des changements climatiques sur la pisciculture et la riziculture seront déterminants. Si les étangs n'étaient plus exploités pour la pisciculture en Dombes, les populations de *Cx. modestus* seraient très probablement affectées. Elles disparaîtraient si les étangs étaient asséchés et remplacés par des cultures sèches ou des pâturages. Au contraire, elles pourraient prospérer si des cultures irriguées, comme le riz, étaient mises en place, la surface de l'habitat larvaire s'en trouvant nettement augmentée. La surface actuelle de roselières en Dombes est d'environ 400 ha [Le Barz & Fouque, 2008]. Si les étangs étaient cultivés en rizières, une surface de près de 12 000 ha pourrait être utilisable, soit autant que la surface actuelle des roselières en Camargue. La surface d'habitat favorable à *Cx. modestus* en Dombes serait alors 30 fois plus importante.

Cette étude ne prend pas en compte la survenue d'évènements climatiques extrêmes. Un épisode pluvieux de faible intensité peut rendre disponible des gîtes qui ne l'étaient pas, tandis que des orages violents peuvent détruire des gîtes ou emporter des larves hors de leur habitat [Wu *et al.*, 2007]. L'intensité des précipitations serait donc importante à prendre en compte. L'étude des impacts du changement climatique sur les populations d'insectes se heurte à un problème d'échelle temporelle. Le climat s'étudie sur plusieurs décennies alors que les populations s'étudient à l'échelle de l'année voire du mois pour les insectes. Il est donc assez difficile d'appréhender l'impact du climat sur les populations et la modélisation offre une bonne alternative pour étudier ces phénomènes se déroulant sur des échelles de temps longues et courtes [Hu *et al.*, 2006].

Avec l'augmentation de l'abondance de *Cx. modestus* en Dombes [Pradel *et al.*, 2009] et dans le contexte d'extension de l'espèce en Europe centrale [Votykka *et al.*, 2008], se pose la question du risque de circulation de maladies transmises par *Cx. modestus*. Cependant, bien que la présence du vecteur soit nécessaire, elle n'est pas suffisante pour entraîner la circulation d'arbovirus. D'autres facteurs liés aux hôtes, aux virus, aux réservoirs, et à l'environnement devraient être considérés pour estimer un risque épidémiologique. Depuis une quarantaine d'années, les maladies vectorielles émergent ou ré-émergent sur le globe. En particulier, les exemples d'apparition d'arboviroses dans de nouvelles zones auparavant indemnes se sont multipliés au cours de la dernière décennie : le virus WN sur le continent américain depuis 1999 et à présent endémique [Ladeau *et al.*, 2007], la fièvre catarrhale ovine en Europe du Nord depuis 2006 [Carpenter *et al.*, 2008], le virus Chikungunya en Italie en 2007 [Angelini *et al.*, 2008], le virus Usutu en Europe centrale depuis 2001 [Brugger *et al.*, 2009], *etc.* Les changements environnementaux et climatiques vont probablement continuer d'engendrer de nouveaux problèmes sanitaires et écologiques. En attendant de connaître leurs impacts, la modélisation permet d'étudier les évolutions possibles et d'anticiper au mieux ces enjeux majeurs.

Si les indices entomo-climatiques s'avéraient pertinents et si le climat évoluait comme attendu d'après le modèle, on peut penser que la prolifération de *Cx. modestus*, vecteur d'arbovirus, dans nos zones d'étude est probable. De nouvelles observations

entomologiques devraient être réalisées pour valider les indices entomo-climatiques que nous avons utilisés. Cette étude illustre une application des indices entomo-climatiques pour la prédiction des populations de

moustiques à partir des seules données climatiques. Néanmoins, d'autres paramètres non climatiques qui influencent, directement ou indirectement, la biologie des moustiques devraient être pris en compte.

BIBLIOGRAPHIE

- Angelini P., Macini P., Finarelli A. C., Pol C., Venturelli C., Bellini R., Dottori M.. - Chinkungunya outbreak in Emilia-Romagna (Italy) during Summer 2007. *Parassitologia*, 2008, **50**, 97-8.
- Balenghien T. - La fièvre du Nil Occidental en Camargue. *Insectes*, 2007, **146**(3), 13-7.
- Bates B.C., Kundzewicz Z.W., Wu S., Palutikof J.P. - Le changement climatique et l'eau, document technique publié par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, Secrétariat du GIEC, 2008, Genève, 236 p.
- Bicout D.J., Sabatier P. - Mapping Rift Valley Fever Vectors and Prevalence Using Rainfall Variations. *Vector-Borne and Zoonotic Diseases*, 2004, **4**(1), 33-41.
- Brugger K., Rubel F. - Simulation of climate-change scenarios to explain Usutu-virus dynamics in Austria. *Prev. Vet. Med.*, 2009, **88**(1), 24-31.
- Carpenter S., Wilson A., P. Melor.S. - Culicoides and the emergence of bluetongue virus in Northern Europe. *Trends Microbiol.*, 2008, **17**, 172-178.
- Chalvet-Monfray K., Sabatier P., Bicout D.J. - Downscaling modeling of the aggressiveness of mosquitoes vectors of diseases. *Ecol. Model.*, 2007, **204**(3-4), 540-6.
- Chuine I., Yiou P., Viovy N., Seguin B., Daux V., Ladurie E.L.R. - Historical phenology: Grape ripening as a past climate indicator. *Nature*, 2004, **432**(7015), 289-90.
- Davies F., Linthicum K., James A. - Rainfall and epizootic Rift Valley Fever. *Bull. World Health Organ.*, 1985, **63**, 941-3.
- Doney S.C. - Oceanography: Plankton in a warmer world. *Nature*, 2006, **444**(7120), 695-696.
- Epstein P. - Climate change and emerging infectious diseases. *Microbes Infect.*, 2001, **3**, 747-757.
- Figuerola J. - Climate and Dispersal: Black-Winged Stilts Disperse Further in Dry Springs. *PLoS ONE*, 2007, **2**(6), e539.
- GIEC. - Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Équipe de rédaction principale, Pachauri, RK et Reisinger, AGIEC, Genève, Suisse, 103 pages. 2007.
- Hu W., Tong S., Mengersen K., Oldenburg B. - Rainfall, mosquito density and the transmission of Ross River virus: A time-series forecasting model. *Ecol. Model.*, 2006, **196**(3-4), 505-14.
- LaDeau S.L., Kilpatrick A.M., Marra P.P. - West Nile virus emergence and large-scale declines of North American bird populations. *Nature*, 2007, **447**(7145), 710-713.
- Le Barz C., Fouque C. - Les roselières de France. Recensement et caractérisation, 16 pp Office National de la Chasse et de la Faune Sauvage et Fédération Nationale des Chasseurs, 2008.
- Martens W.J., Niessen L.W., Rotmans J., Jetten T.H., McMichael J. - Potential impact of global climate change on malaria risk. *Environ. Health Persp.*, 1995, **103**, 458-464.
- Mouchet J., Rageau J., Chippaux A. - Hibernation de *Culex modestus* Ficalbi (Diptera, Culicidae) en Camargue. *Cah. ORSTOM, sér. Ent Méd. Parasitol.*, 1969, **7**, 35-37.
- Mouchet J., Rageau J., Laumond C., Hannoun C., Beytout D., Oudar J. et al. - Epidémiologie du virus West Nile : étude d'un foyer en Camargue. V- Le vecteur:

- Culex modestus* Ficalbi Diptera; Culicidae. *Ann Inst Pasteur Paris.*, 1970, **118**, 839-855.
- Nakicenovic N., Davidson O., Davis G., Grübler A., Kram T., Lebre La Rovere E. *et al.* - Rapport spécial du Groupe de travail III : Résumé à l'intention des décideurs : Scénarios d'émissions, Secrétariat du GIEC, Genève, 2000, 27 p.
- Pagé C., Terray L., Boé J. - Projections climatiques à l'échelle fine sur la France pour le 21ème siècle : les scénarii SCRATCH08. Technical Report TR/CMGC/08/64, CERFACS, Toulouse, France, 2008.
- Ponçon N., Balenghien T., Toty C., Ferré J.-B., Thomas C., Dervieux A., L'ambert G., Schaffner F., Bardin O., Fontenille D. - Effects of local anthropogenic changes on potential malaria vector *Anopheles hyrcanus* and West Nile virus vector *Culex modestus*, Camargue, France. *Emerg. Infect. Dis.*, 2007, **13**, 1810-1815.
- Pradel J.A., Martin T., Rey D., Foussadier R., Bicout D.J. - *Culex modestus* (Ficalbi), vecteur de virus West Nile en Camargue : une espèce en augmentation dans la Dombes ? *Epidémiol. et santé anim.*, 2008, **53**, 105-119.
- Pradel J.A., Martin T., Rey D., Foussadier R., Bicout D.J. - Is *Culex modestus* (Diptera : Culicidae), vector of West Nile virus, spreading in the Dombes area (France) ? *Journal of Medical Entomology*. 2009. In press.
- Reiter P. Climate Change and Mosquito-Borne Disease. *Environmental Health Perspectives.*, 2001, **109**, 141-161.
- Reiter P. - Climate change and mosquito-borne disease: knowing the horse before hitching the cart. *Rev. Sci. Tech. Off. Int. Epiz.*, 2009, **27**, 383-398.
- Rogers D.J., Randolph S.E. - Climate change and vector-borne diseases. *Advances in parasitology.*, 2006, **62**, 346-381.
- Rubel F., Brugger K., Hantel M., Chvala-Mannsberger S., Bakonyi T., Weissenböck H. *et al.* - Explaining Usutu virus dynamics in Austria: Model development and calibration. *Prev. Vet. Med.*, 2008, **85**(3-4), 166-186.
- Townsend Peterson A., Stewart A., Mohamed K., Araujo M. - Shifting Global Invasive Potential of European Plants with Climate Change. *PLoS ONE.*, 2008, **3**(6).
- Van der Weijden W.J., Marcelis R.A.L., Reinhold W. - Invasions of vector borne diseases driven by transportation and climate change, In Willem Takken and Bart G.J. Knols [eds.], *Emerging pests and vector borne diseases in Europe*. Wageningen Academic Publishers, 500 pp. Wageningen, 2007.
- Votýpka J., Seblova V., Radrova J. - Spread of the West Nile virus vector *Culex modestus* and the potential malaria vector *Anopheles hyrcanus* in central Europe. *Journal of Vector Ecology.*, 2008, **33**(2), 269-277.
- Wu P.C., Guo H.R., Lung S.C., Lin C.Y., Su H.J. - Weather as an effective predictor for occurrence of dengue fever in Taiwan. *Acta Tropica.*, 2007, **103**(1), 50-57.



Remerciements

Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet ACCIES (Analyse du changement climatique et de ses impacts sur l'eau et la santé) financé par le Ministère de l'environnement. Consortium ACCIES : EPSP TIMC-IMAG/ENVL, LTHE, CRC, CNRM, CERFACS, Fondation Sansouïre (FS), Malaria Research and Training Center (MRTC), Institut Pasteur de Dakar (IPD), Centre écologique de Dakar (CSE). Nous remercions Philippe Sabatier, coordinateur du projet ACCIES, pour son aide et les discussions instructives.