

ETUDE ECOLOGIQUE DES MOUSTIQUES (*DIPTERA, CULICIDAE*) - VECTEURS POTENTIELS D'ARBOVIROSES DANS LA REGION RHONE-ALPES *

Jennifer Pradel¹, Delphine Rey¹, Rémi Foussadier²
et Dominique Bicot¹

RESUME : Bien qu'aucune arbovirose majeure n'ait été mise en évidence en Rhône-Alpes jusqu'à présent, les changements environnementaux et climatiques, en cours et à venir, pourraient favoriser la survenue de maladies vectorielles dans la région en induisant des modifications sur les populations culicidiennes. L'inventaire des moustiques dans cette région a révélé la présence d'une quarantaine d'espèces dont l'importance médicale et vétérinaire en Rhône-Alpes n'est pas connue. Parmi celles-ci, certaines espèces ont été impliquées dans la circulation de plusieurs arbovirus dans d'autres pays européens. Nous avons élaboré une classification des culicidés de cette région dans le but de regrouper les espèces les plus proches du point de vue bioécologique. Chaque classe étant représentée par une espèce, nous avons dressé ainsi une liste des espèces de moustiques potentiellement intéressantes à étudier du point de vue sanitaire. Les résultats préliminaires et provisoires présentés ici s'inscrivent dans un cadre plus général visant à développer des études sur le rôle des facteurs environnementaux sur les populations vectorielles et à définir des « indicateurs entomologiques » de changements environnementaux.

Mots-Clés : Arbovirus, Changements environnementaux, Rhône-Alpes, Culicidae, Classification.

SUMMARY: Although no important mosquito borne arbovirus has been reported circulating in the Rhône-Alpes region (South-Eastern France) current and forthcoming environmental changes in the climate may promote the invasion of arboviruses in this region by inducing modifications in mosquito populations. The inventory of indigenous mosquito species identified about forty species whose relevance for public health is unknown but also several species known to be involved in transmission of viruses in other European countries. With the aim to focus studies on few interesting species, we have designed a classification system based on various biological criteria including habitat characteristics for Culicidae in this region. We drew thus a list of potentially interesting mosquito species each of which is a leading member of a classification group. The preliminary results reported in this paper fit into a more global framework designed to determine the role of environmental factors on vector populations and to define entomological markers of environmental changes.

Keywords: Arboviruses, Environmental changes, Rhône-Alpes (France), Culicidae, Classification.



* Texte de la communication orale présentée lors de la Journée AEEMA, 1^{er} juin 2007

¹ Unité biomathématique et épidémiologie, Laboratoire TIMC-EPSP, ENVL, 1 avenue Bourgelat, 69280 Marcy l'Etoile, France

² Entente Interdépartementale Ain, Isère, Rhône, Savoie, pour la Démoustication. BP2, 73310 Chindrieux, France

Mails des auteurs correspondants : Jennifer.Pradel@imag.fr; [bicout@ill.fr](mailto:bicot@ill.fr)

I - INTRODUCTION

Cette année, les experts du GIEC ont rendu publique leurs contributions au quatrième rapport d'évaluation sur le changement climatique. Ils confirment avec une meilleure précision ce que les précédents avaient annoncé : le climat de la terre a changé et va continuer d'évoluer, la température globale moyenne va augmenter de 1,1 à 6,4°C d'ici 2100 selon les scénarios, les événements climatiques extrêmes seront plus fréquents, lesquels changements ne seront pas uniformes mais connaîtront d'importantes disparités régionales [GIEC-1]. Selon l'ampleur de l'augmentation de la température moyenne, d'importantes modifications pourraient se produire sur les écosystèmes, notamment sur les aires de répartition des espèces et les interactions écologiques [GIEC-2].

Depuis plusieurs décennies, on assiste à un regain d'activité et à une extension des maladies vectorielles transmises par des moustiques. C'est ainsi que le virus *West Nile* (WN), inconnu du nouveau monde avant 1999, s'est installé durablement dans l'ensemble des Etats-Unis et s'est propagé dans de

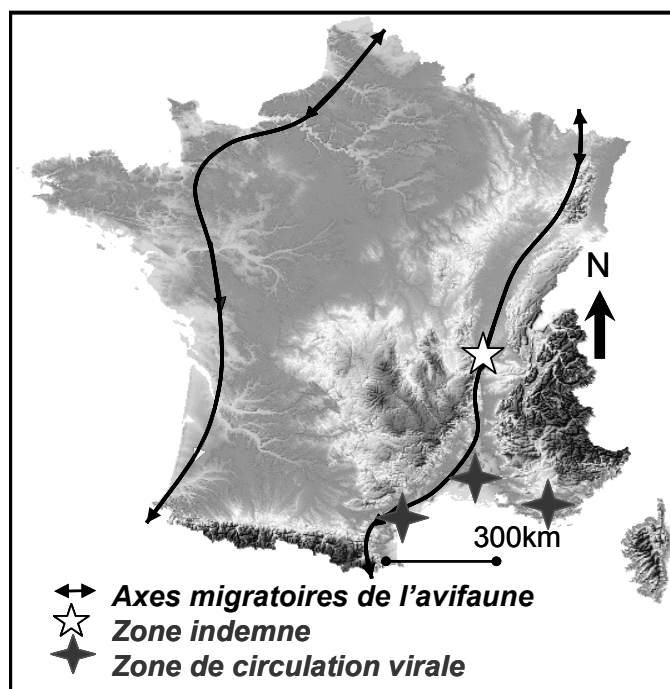
nombreuses zones du continent nord et sud américain, en Amérique Centrale et dans les Caraïbes [O'Leary *et al.*, 2004 ; Deubel *et al.*, 2001 ; Blitvich *et al.*, 2003 ; Lefrançois *et al.*, 2005]. En France, par exemple, deux arbovirus circulent dans la zone méditerranéenne :

- le virus *Tahyna* (*Bunyavirus*, *Bunyaviridae*), trouvé occasionnellement chez des patients développant des syndromes fébriles aigus ou dans des lots de moustiques [Hannoun *et al.*, 1966 ; Chippaux *et al.*, 1970] ;
- le virus WN (*Flavivirus*, *Flaviviridae*) qui a réémergé en 2000 et circule régulièrement depuis en Camargue et sur le littoral méditerranéen après trois décennies d'absence apparente [Murgue *et al.*, 2001 ; Durand *et al.*, 2005].

Dans les autres régions françaises et, en particulier, en Rhône-Alpes, aucune circulation de ces arbovirus n'a été rapportée jusqu'à présent [Lena *et al.*, 2006 ; Zeller H., com. pers.]

Figure 1

Localisation des zones de circulation des arbovirus *West Nile* et *Tahyna*, de la zone d'étude et des deux principaux couloirs de migration de l'avifaune en France



Depuis plusieurs années, la question de l'impact du changement climatique sur la santé, en particulier sur les maladies vectorielles, a pris une ampleur considérable dans la communauté scientifique. En effet, la biologie des arthropodes hématophages vecteurs dépend du milieu extérieur et, en particulier, des conditions de température et d'humidité [Dow *et al.*, 1970 ; Clements *et al.*, 1999 ; Reiter, 1988]. De plus, la capacité d'un vecteur à transmettre un arbovirus peut être modifiée par certains facteurs environnementaux comme la température [Cornel *et al.*, 1993 ; Dohm *et al.*, 2002]. Les maladies vectorielles pourraient voir leur répartition et leur fréquence de survenue modifiées [GIEC-2 ; Patz, 2005 ; Hales *et al.*, 2002 ; Epstein, 2001 ; Purse *et al.*, 2005 ; Zell, 2004].

Dans l'état actuel de nos connaissances, aucune étude du risque d'apparition d'arboviroses dues à des moustiques n'a été entreprise dans la région Rhône-Alpes. Pourtant, les occasions d'introduction virale sont multiples. En effet, située à 300 km environ du pourtour méditerranéen, la région Rhône-Alpes est reliée à celui-ci par le couloir rhodanien, axe majeur de circulation et par lequel remonte l'influence du climat méditerranéen. De plus, la région est parcourue du Nord au Sud par un des axes de migrations de l'avifaune les plus importants (l'axe « Rhin Rhône Méditerranée ») et

présente des sites fréquentés par de nombreux oiseaux migrateurs, porteurs potentiels de virus, pour l'hibernation et/ou la reproduction. Les récents exemples d'apparition de maladies vectorielles dans des zones jusqu'alors indemnes posent la question de l'influence des changements environnementaux sur les conditions et les milieux favorables à l'installation de cycles épidémiologiques. Dans ce contexte de changement climatique et d'émergence de maladies vectorielles, l'initiation d'une étude sur les moustiques vecteurs potentiels d'arbovirus dans la région est un préalable nécessaire vers une étude plus générale. L'objectif de ce travail est de présenter les résultats préliminaires de l'étude écologique des moustiques dans la région Rhône-Alpes, menée depuis 2006. Dans un premier temps, un inventaire des espèces de moustiques présentes dans la région a été effectué. Nous avons ensuite cherché à estimer quelle pouvait être l'implication de chacune dans la transmission de certains virus. Enfin, une méthode visant à limiter l'étude à un nombre restreint d'espèces a été recherchée. Ceci a abouti à une classification bioécologique des espèces basée sur des critères simples et faciles à appréhender sur le terrain ou dans la littérature. La méthodologie ainsi développée pourrait être adaptée puis appliquée dans d'autres régions.

II - MATERIELS ET METHODES

1. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

Deuxième région de France par sa population et sa taille, la région Rhône-Alpes comprend huit départements très contrastés au niveau des paysages, allant des plaines aux massifs montagneux élevés. Il en découle une variété de climats: méditerranéen, continental et montagnard. Une particularité climatique est à noter dans le Rhône, due à sa situation entre deux massifs montagneux, à l'origine d'un « effet couloir ». Le sud du couloir subit une influence méditerranéenne et le vent du Mistral s'y engouffre parfois fortement. Cette diversité de milieux sous-tend une diversité faunistique, et culicidienne en particulier, importante. Notre région d'étude est une zone de 40 km de côté comprenant deux zones humides du département de l'Ain : la Dombes

et la Basse Vallée de l'Ain. La première, à vocation piscicole, comporte de nombreux étangs ; la seconde est essentiellement constituée de bras de rivières et d'affluents de l'Ain qui mettent en eau les terres environnantes lors des crues hivernales. Ce sont deux zones naturelles exceptionnelles qui ne sont pas soumises aux traitements anti-moustiques de l'Entente Interdépartementale pour la Démoustication (EID).

2. INVENTAIRE DES MOUSTIQUES

Une revue aussi exhaustive que possible de la littérature a été effectuée pour rechercher les espèces recensées dans les différents départements, et, en particulier, dans notre zone d'étude. De plus, une enquête entomologique a été réalisée entre avril et

novembre 2006 dans six sites choisis en fonction de leur localisation, de la présence de gîtes larvaires potentiels et de la diversité des milieux. Des larves de moustiques ont été collectées dans les gîtes larvaires potentiels, ramenées au laboratoire, tuées, conservées dans de l'alcool puis identifiées sur la base de critères morphologiques définis par Becker [2003] et Schaffner [2001].

Les moustiques adultes ont été capturés une à quatre fois par mois, en fonction des conditions météorologiques et de la saison. Des captures sur volontaire humain (un agent effectuant deux séries de captures de dix minutes) ont été menées dans tous les sites et des pièges lumineux à CO₂ ont été posés le soir puis récupérés le lendemain matin dans quatre sites. A l'issue des captures, les moustiques ont été ramenés au laboratoire, tués par le froid, triés puis identifiés selon les mêmes clefs d'identification.

3. QUELLES ESPECES ETUDIER ?

Toutes les espèces de moustiques de la région ne peuvent être étudiées de façon raisonnable compte tenu du temps et de la quantité de travail que cela nécessiterait mais aussi du fait que toutes les espèces ne présentent pas d'intérêt sanitaire ou de nuisance pour l'homme. Nous avons donc entrepris d'élaborer une liste des espèces d'intérêt sur la base des deux critères suivants :

1. risque pour ces espèces de constituer un danger (détermination du potentiel vecteur) ou une nuisance et,
2. abondance des espèces dans la région.

3.1. DETERMINATION DU « POTENTIEL VECTEUR »

Pour qu'une espèce de moustique soit considérée comme vectrice de maladie,

plusieurs conditions doivent être satisfaites : l'espèce doit être trouvée infectée à plusieurs reprises dans la nature, elle doit être compétente en laboratoire et enfin, avoir une biologie compatible avec une transmission du virus dans la nature (préférence trophique, présence en densité importante pendant la période de circulation virale, etc.) [Rhodain, 1985]. Lorsque ces conditions sont partiellement remplies, l'espèce est considérée comme potentiellement vectrice de maladie.

Pour chaque espèce recensée, nous avons donc cherché dans la littérature des preuves d'implication dans des transmissions de virus. Nous nous sommes limités aux virus circulant couramment en Europe: virus *West Nile*, *Tahyna*, *Sindbis*, *Lednice*, *Inkoo* et *Batai* [Lundstrom, 1999]. Bien qu'un certain nombre d'espèces connaissent une distribution holarctique (zone paléarctique & Amérique du Nord), nous nous sommes limités aux données de la littérature européenne. A partir des informations collectées pour chaque espèce, une note (de 0 à 5) reflétant un degré d'implication potentielle dans la transmission d'un ou plusieurs arbovirus a été attribuée. La définition des notes est indiquée dans le tableau 1.

3.2. ABONDANCE

Les données de terrain ont été utilisées pour estimer l'abondance des espèces aux stades adulte et larvaire, sur l'ensemble de la zone d'étude et pendant toute la saison de terrain 2006 [Pradel *et al.*, 2007a]. Des difficultés d'interprétation des abondances relatives des espèces au niveau larvaire sont inhérentes aux techniques d'échantillonnage, ainsi qu'aux différences de productivité entre espèces ; néanmoins, elles donnent une bonne indication sur l'abondance d'une espèce dans son environnement.

Tableau 1
Valeurs du potentiel vecteur attribuées à chaque espèce

Indice	Définition
0	- Absence d'information concernant l'espèce ou - Espèce non impliquée dans la transmission de maladies
1	- Espèce infectée naturellement
2	- Espèce compétente en laboratoire (faible, modérée ou forte)
3	- Espèce infectée naturellement et compétente
4	- Espèce vectrice avérée dans un autre pays
5	- Espèce vectrice avérée en France

3.3. CLASSIFICATION BIOECOLOGIQUE DES ESPECES

Afin de hiérarchiser l'importance des espèces et de cibler l'étude sur un petit nombre d'espèces, nous avons cherché un moyen de regrouper les espèces proches par une classification. Cette classification a été effectuée sur les espèces de la région Rhône-Alpes en nous inspirant de récents travaux de Crans (2004) pour sa construction. Crans a établi un nouveau système de classification des espèces du Nord Est des Etats-Unis en utilisant les critères relatifs au cycle biologique, également utilisés dans les précédentes classifications [Bates, 1949 ; Pratt, 1959], et des critères relatifs aux biotopes larvaires. A partir de son expérience de terrain, il a établi une classification empirique en plaçant dans les classes qu'il avait définies les espèces qu'il connaissait.

Dans notre démarche, nous avons basé la classification sur trois critères relatifs au cycle biologique (nombre de générations annuelles, substrat de ponte et stade de passage de l'hiver) et deux critères relatifs à l'habitat et à l'environnement (boisement et type d'eau stagnante) [Pradel *et al.*, 2007 b]. Pour ce faire, une base de données a été constituée pour l'ensemble des espèces recensées, en utilisant les données de la littérature, les observations de terrain et l'expérience des agents de l'EID. Ensuite, nous avons utilisé une méthode de classification automatique (Classification Ascendante Hiérarchique, CAH), à l'aide du logiciel de traitement statistique R, version 2.0.1 et du pack « Cluster ». Des modifications subjectives ont ensuite été apportées afin d'obtenir une classification « idoine », adaptée au contexte local et aux objectifs des études envisagées [Pradel *et al.*, 2007b].

III - RESULTATS

1. INVENTAIRE DES ESPECES

En tout, 41 espèces de cinq genres ont été recensées dans l'ensemble des départements Rhône-alpins. Vingt-cinq espèces appartenant à cinq genres ont été collectées dans la zone d'étude en 2006 [Pradel *et al.*, 2007a].

La figure 2 présente pour chaque espèce les « potentiels vecteurs » déterminés à partir de la bibliographie collectée jusqu'à présent (ce tableau n'a donc pas de caractère définitif et

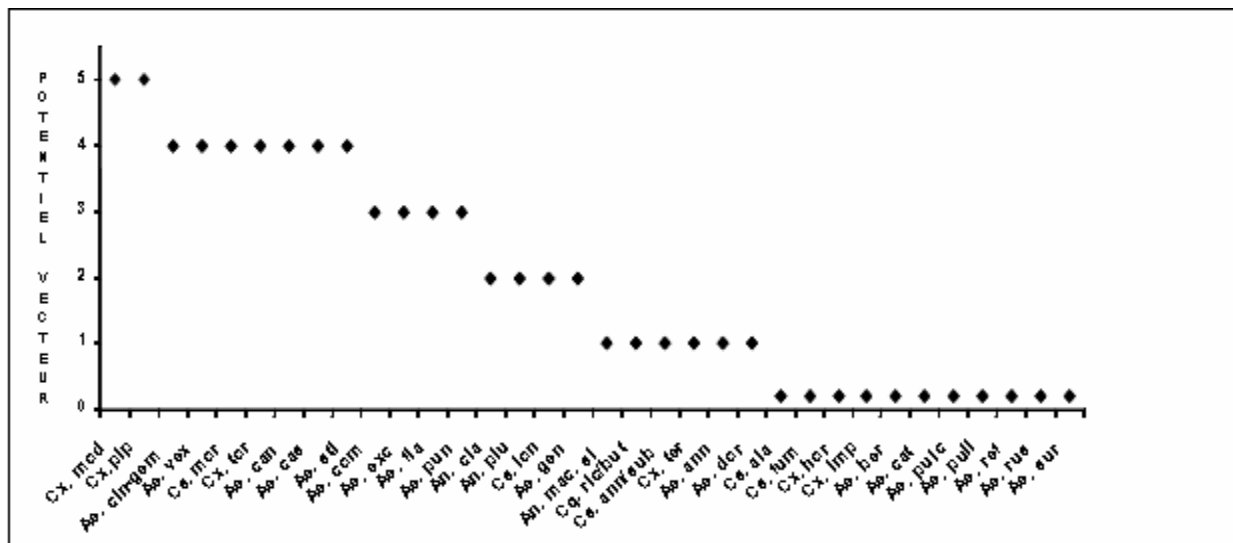
est susceptible de changer à la lumière de nouvelles informations).

Elle montre que la plupart des espèces ont été trouvées infectées par au moins un des six virus mentionnés précédemment; seules 11 espèces semblent n'avoir jamais été impliquées dans des transmissions virales. Si l'on devait choisir les espèces à étudier sur la base de ce critère, nous pourrions décider d'étudier les espèces présentant un potentiel vecteur supérieur ou égal à 3, soit 13 espèces parmi les 41 initiales.

Figure 2

Potentiels vecteurs des espèces ou groupes d'espèces de la région

Légende : Cx. mod = *Cx. modestus* ; Cx. pip = *Cx. pipiens* ; Ae. vex = *Ae. vexans* ; Cs. mor = *Cs. morsitans* ; Cx. tor = *Cx. torrentium* ; Ae. cant = *Ae. cantans* ; Ae. cas = *Ae. caspius* ; Ae. sti = *Ae. sticticus* ; Ae. com = *Ae. communis* ; Ae. exc = *Ae. excrucians* ; Ae. fla = *Ae. flavescens* ; Ae. pun = *Ae. punctator* ; An. cla = *An. claviger* ; An. plu = *An. plumbeus* ; Cs. lon = *Cs. longiareolata* ; Ae. gen = *Ae. geniculatus* ; An. mac.sl = espèces du complexe *An. maculipennis* ; Cq. ric/but = *Cq. richiardii / buxtoni* ; Cs. ann/sub = *Cs. annulata / subochrea* ; Cx. ter = *Cx. territans* ; Ae. ann = *Ae. annulipes* ; Ae. dor = *Ae. dorsalis* ; Cs. ala = *Cs. alaskaensis alaskaensis* ; Cs. fum = *Cs. fumipennis* ; Cx. hor = *Cx. hortensis* ; Cx. imp = *Cx. impudicus* ; Ae. ber = *Ae. berlandi* ; Ae. cat = *Ae. cataphylla* ; Ae. pulc = *Ae. pulchritarsis* ; Ae. pull = *Ae. pullatus* ; Ae. ref = *Ae. refiki* ; Ae. sur = *Ae. surcouffi*.



2. ABONDANCE ET POTENTIEL VECTORIEL

La figure 3 illustre à la fois le potentiel vecteur et l'abondance des espèces aux stades larvaire et adulte pour les espèces de la zone d'étude. On remarque chez les adultes que les espèces les plus abondantes ont également un potentiel vecteur élevé. *Aedes cinereus* domine largement dans les prélèvements aux stades larvaire et adulte.

A la lumière de ces nouveaux résultats, on peut sélectionner dans la zone d'étude les espèces suivantes : *Ae. cinereus/geminus*, *Ae. cantans/annulipes*, *Cx. pipiens*, *Cx. modestus*, *Ae. sticticus* et *Cs. morsitans*, soit six espèces (ou groupes d'espèces) sur les 25 initiales. Ces six espèces sont, du point de vue de leur potentiel vecteur et de leur abondance, les plus susceptibles de présenter un danger sanitaire.

3. CLASSIFICATION BIOÉCOLOGIQUE DES ESPÈCES

Les résultats de la classification sont présentés dans le tableau 2, où chaque classe comprend une ou plusieurs espèces de moustiques.

On distingue 14 classes (numérotées de 1 à 14), comportant chacune une à sept espèces. Les classes peuvent être réunies en six groupes (A à F), chacun composé d'une à quatre classes et de une à 14 espèces de moustiques. Chaque groupe se distingue des autres par ses caractéristiques biologiques et représente un type de cycle de vie particulier (cf. tableau 2). Au sein d'un même groupe, chaque classe se distingue des autres essentiellement par ses caractéristiques écologiques. On remarque que trois groupes (D, E, F) ne comportent qu'une classe (respectivement les classes 10, 14 et 11) composée d'une ou deux espèces très proches ; ces espèces ont un cycle biologique unique qui n'est partagé par aucune autre espèce.

Tableau 2
Classification (provisoire) bioécologique des espèces de moustiques de la région Rhône-Alpes.

Groupe		A		B		C		« Types uniques »			
		Multivoltin		Univoltin		Multivoltin		D	E	F	
CYCLE	Voltinisme		Multivoltin		Univoltin		Multivoltin		Univoltin	Univoltin	Multivoltin
	Substrat de ponte		Substrat humide *		Substrat humide *		Eau		Eau	Eau	Eau et terre
	Stade de passage de l'hiver		Œuf	Œuf et larve	Œuf	Œuf ou larve	Adulte	Larve et adulte	Adulte	Larve	Larve
ÉCOLOGIE	Zone boisée	Temporaire	UF1	1 <i>Ae. cinereus</i> <i>Ae. geminus</i> <i>Ae. vexans</i> <i>Ae. sticticus</i>	3 <i>An. plumbeus</i> <i>Ae. berlandi</i> <i>Ae. geniculatus</i> **	6 <i>Ae. annulipes</i> <i>Ae. cantans</i> <i>Ae. cataphylla</i> <i>Ae. punctor</i> <i>Ae. pullatus</i> <i>Ae. excrucians</i>	5 <i>Cs. morsitans</i> <i>Ae. refiki</i> <i>Ae. rusticus</i>	13 <i>Cx. pipiens</i> <i>Cx. torrentium</i> <i>Cx. hortensis</i> <i>Cx. mimeticus</i>	12 <i>Cs. subochrea</i>	10 <i>Cs. alaskaensis</i>	11 <i>An. claviger</i>
		Permanent	UF2			6 <i>Ae. excrucians</i>		13 <i>Cx. pipiens</i> <i>Cx. torrentium</i> <i>Cx. hortensis</i> <i>Cx. Mimeticus</i>		10 <i>Cs. alaskaensis</i>	11 <i>An. claviger</i>
	Zone non boisée	Temporaire	UF3	1 <i>Ae. cinereus</i> <i>Ae. geminus</i> <i>Ae. vexans</i> <i>Ae. sticticus</i>		6 <i>Ae. annulipes</i> <i>Ae. cantans</i> <i>Ae. cataphylla</i> <i>Ae. punctor</i> <i>Ae. pullatus</i> <i>Ae. excrucians</i>	5 <i>Cs. morsitans</i> <i>Ae. refiki</i> <i>Ae. rusticus</i>	8 <i>An. maculipennis</i> (sl) <i>Cx. impudicus</i> Cx. modestus <i>Cx. territans</i>	9 <i>Cs. annulata</i> <i>Cs. longiareolata</i>		11 <i>An. claviger</i>
		Permanent	UF4	2 <i>Ae. caspius</i> <i>Ae. dorsalis</i>		4 <i>Ae. flavescens</i> <i>Ae. surcoufi</i> Cs. fumipennis		13 <i>Cx. pipiens</i> <i>Cx. torrentium</i> <i>Cx. hortensis</i> <i>Cx. mimeticus</i>	12 <i>Cs. subochrea</i>		
	Permanent	UF4	2 <i>Ae. caspius</i> <i>Ae. dorsalis</i>		6 <i>Ae. excrucians</i>		8 <i>Cx. impudicus</i> Cx. modestus <i>Cx. territans</i> <i>An. maculipennis</i> (sl)	9 <i>Cs. annulata</i> <i>Cs. longiareolata</i>		14 <i>Cq. richiardii</i> <i>Cq. buxtoni</i>	11 <i>An. claviger</i>

Légende : Classe contenant au moins une espèce ; Classe vide ; Classe ne contenant pas d'espèce potentiellement vectrice de maladie et abondante dans la région ; Classe contenant au moins une espèce potentiellement vectrice de maladie et abondante dans la région. * Substrat humide : désigne le sol, la terre, des feuilles ou, pour les espèces arboricoles la paroi de l'arbre ou la litière tapissant le fond du creux de l'arbre ** Espèce capable de pondre sur un substrat humide ou à la surface de l'eau. Espèce écrite en gras : espèce représentative de la classe ; UF : Unité fonctionnelle

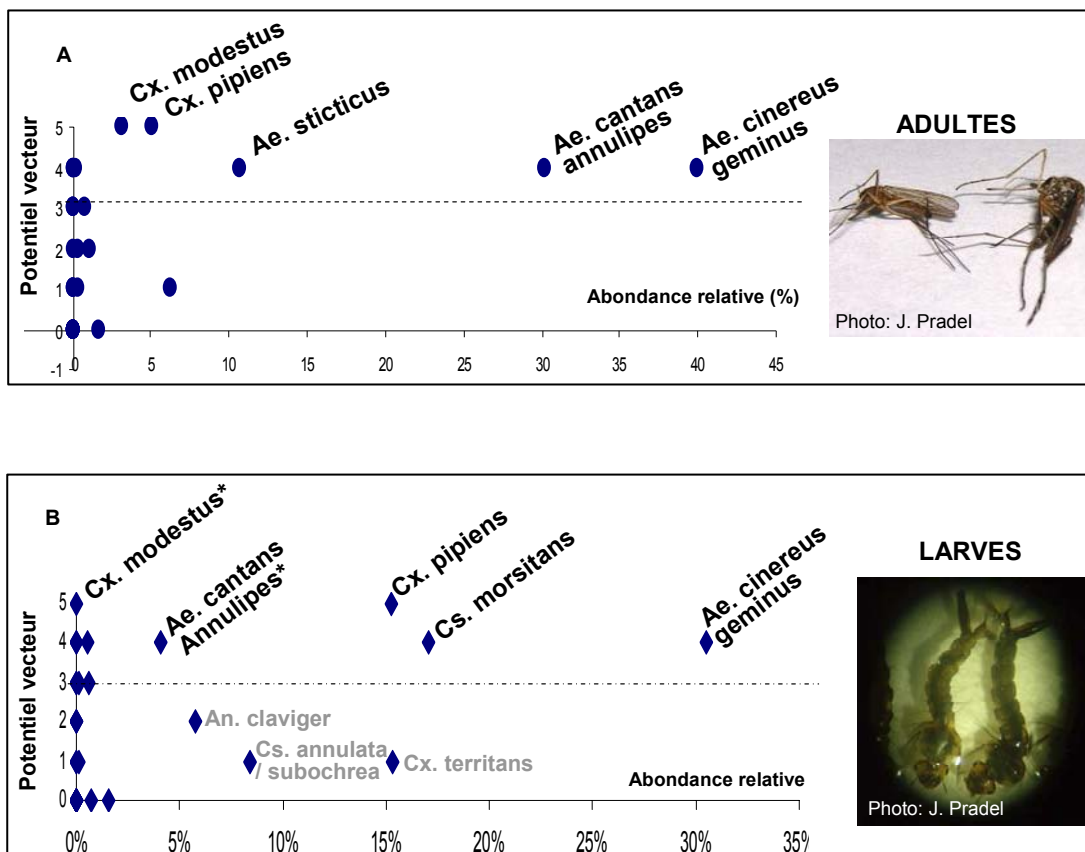
Au contraire, les autres groupes (A, B, C) comprennent un plus grand nombre de classes, indiquant que les types de cycles biologiques correspondants sont les plus fréquents (par ex. quatre classes et 14 espèces de moustiques partagent le type de cycle du groupe B). Enfin, dans chaque classe, une espèce représentative (indiquée en gras dans le tableau 2) a été choisie : il s'agit de la plus connue ou de la plus fréquente dans la

région ou, à défaut, de la plus étudiée dans la littérature.

Les six espèces mentionnées précédemment, à la fois potentiellement vectrices de maladies et fréquentes dans la région, appartiennent à cinq classes (indiquées par des ronds noirs numérotés dans le tableau 2). Ainsi, il est possible de limiter l'étude aux classes 1, 5, 6, 8 et 13.

Figure 3

Abondances relatives des espèces : adultes (A) et larves (B). * Abondance sous estimée en raison du type de gîte larvaire prospecté (Cx. modestus se trouve surtout dans les gîtes permanents tandis que la plupart des gîtes prospectés en 2006 étaient temporaires) et des dates de prospection (en Avril, la plupart des larves d'Aedes cantans avaient terminé leur développement).



4. OBJECTIFS DE LA CLASSIFICATION

La classification des espèces ainsi développée trouverait son utilité dans deux applications ultérieures, que seraient :

1. la définition d' «unités fonctionnelles » et la détermination de leur distribution spatiale;

2. l'étude de la phénologie et de la saisonnalité de certains aspects de la biologie des populations culicidiennes.

4.1. DEFINITION ET DISTRIBUTION D'UNITES FONCTIONNELLES

Nous définissons une « unité fonctionnelle » (UF) comme une entité environnementale, décrite par un certain nombre de variables et susceptible de constituer un site favorable à la ponte et au développement des larves de moustiques, sous certaines conditions environnementales (de mise en eau notamment, de température, d'humidité, ...). Dans une première approche, simplifiée, le tableau 2 permettrait de définir quatre UF, simples et grossières en considérant deux variables environnementales : le boisement (zone boisée / non boisée) et la stagnation de l'eau (eau permanente / temporaire). Elles sont nommées « UF1 », « UF2 », « UF3 » et « UF4 » dans le tableau. Par la suite, la représentation cartographique de ces variables environnementales dans un Système d'Information Géographique (SIG) permettrait de répartir ces UF dans l'espace.

Ensuite, à chaque UF, pourraient être associées les classes de moustiques correspondantes, en se référant au tableau de classification. Ceci permettrait dans un premier temps de discriminer des zones potentiellement plus favorables au développement des moustiques, dans la mesure où la répartition des UF englobe celle des différentes classes de moustiques. Dans un deuxième temps, la distinction de zones potentiellement « à risque », du point de vue vectoriel uniquement, serait envisageable en étudiant la répartition des UF qui hébergent les classes comportant les espèce(s) d'importance sanitaire.

4.2. PHENOLOGIE ET SAISONNALITE

L'étude de la dynamique de population des moustiques au sein des UF et, en particulier, de la saisonnalité de certains phénomènes biologiques, est également très importante. En effet, certains aspects de la biologie des

moustiques sont déterminants pour la capacité vectorielle (par ex., la période de présence et du pic d'abondance des moustiques doit coïncider avec celle des hôtes du cycle épidémiologique). Le cycle biologique des moustiques se déroule en plusieurs étapes : éclosion, développement larvaire, nymphose, émergence et phase de diapause intervenant à différents stades du développement en fonction des espèces. Cette succession d'étapes et son timing, ou phénologie, dépend des caractéristiques saisonnières, en particulier des conditions de température et d'humidité, des précipitations et de la photopériode. Les changements climatiques à venir pourraient entraîner d'importantes modifications biologiques et phénologiques : décalage du pic de population, apparition plus précoce des individus, allongement de la période de reproduction, augmentation du nombre de générations annuelles, levée ou induction de diapause plus ou moins précoce/tardive, etc. Toutes ces modifications peuvent avoir un impact sur la capacité des espèces à transmettre des agents pathogènes.

Une bonne connaissance de la biologie et de la phénologie des espèces est nécessaire pour estimer le nombre de générations annuelles, les périodes de présence des larves et des adultes, de pics de populations et d'entrée et de sortie de diapause, etc. Si ces informations ne sont pas connues pour toutes les espèces, il est néanmoins possible d'en avoir une idée pour chaque classe par l'intermédiaire des espèces représentatives, soit à partir de données de la littérature, soit à partir d'observations de terrain ou de la mise en place d'expériences.

La connaissance de la phénologie des espèces d'intérêt, ainsi que de ses déterminants est nécessaire pour estimer les changements que l'on pourrait observer sous un autre climat. Pour ce faire, l'utilisation de la modélisation comme outil d'étude est envisagée.

IV - DISCUSSION

1. CONCERNANT LE POTENTIEL VECTEUR

Nous avons estimé le danger que pourrait représenter une espèce en termes de transmission virale par l'attribution d'une note

allant de 0 à 5. Les valeurs d'indice, définies dans le tableau 1, sont à prendre avec précaution dans la mesure où il s'agit de résultats préliminaires obtenus à partir de la recherche documentaire assemblée à ce jour,

recherche non exhaustive et susceptible d'évoluer, et où ii/ une espèce impliquée ou non dans la transmission d'une maladie dans un environnement donné n'entraîne pas qu'elle le soit également dans un autre environnement.

Notre méthode peut donc surestimer ou sous-estimer le potentiel vecteur d'une espèce. Néanmoins, plusieurs faits permettent de soutenir notre démarche:

- Une même espèce est souvent vectrice d'arbovirus dans plusieurs endroits, même très éloignés : par exemple, *Cx. pipiens* est le vecteur principal du virus *WN* dans les zones urbaines des zones tempérées aux Etats-Unis, en Roumanie et en Russie et un vecteur probable dans des zones naturelles en France [Fyodorova *et al.*, 2006, Fonseca *et al.*, 2004 ; Savage *et al.*, 1999 ; Kilpatrick *et al.*, 2005, Turell *et al.*, 2001 ; Balenghien *et al.*, 2006 ; Balenghien *et al.*, 2007].
- Certaines espèces n'ont jamais été impliquées dans des épisodes de circulation virale, quels que soient les endroits [Schaffner *et al.*, 2001].

L'indice « 0 » a été attribué lorsqu'aucune information n'était disponible dans la littérature sur une espèce, la considérant ainsi comme probablement sans intérêt sanitaire. Le potentiel vecteur de ces espèces a donc pu être sous-évalué. Néanmoins, l'absence de suspicions ou de recherches portant sur ces espèces dans la littérature de plusieurs pays indique vraisemblablement une importance très faible de l'espèce.

Ces éléments nous permettent de penser que nos résultats sont fiables, au moins pour les espèces pour lesquelles nous avons attribué des notes extrêmes (0 ou 1 et 4 ou 5).

La note « 3 » a été attribuée aux espèces à la fois compétentes et infectées naturellement, ce qui correspond en réalité à deux cas :

1. Aux espèces qui sont infectées naturellement par un ou plusieurs virus et compétentes pour un ou plusieurs autres;
2. Aux espèces qui sont infectées naturellement et compétentes pour ce(s) même(s) virus.

Cette valeur est donc ambiguë car elle correspond à deux degrés différents de preuve d'implication d'une espèce dans la transmission d'un virus. Après une revue de la littérature aboutie, il conviendra d'adapter

l'échelle en divisant le groupe actuel « 3 » en deux distincts.

De manière générale, une étude actualisée de la bibliographie doit être poursuivie afin de tenir compte de l'évolution du contexte sanitaire et de découvertes récentes pour attribuer des valeurs d'indice fiables pour chaque espèce.

Finalement, la démarche présentée - attribution d'un indice de potentiel vecteur et prise en compte de l'abondance de chaque espèce dans la région - permet de dresser un cadre méthodologique aboutissant à la hiérarchisation de l'importance des espèces, sans *a priori*. D'autres critères pourraient être pris en compte pour affiner encore la liste ou l'adapter selon les objectifs.

2. A PROPOS DE LA CLASSIFICATION ET SES OBJECTIFS

Le principe de regroupement d'espèces de moustiques ayant les mêmes caractéristiques biologiques ou partageant les mêmes habitats n'est pas nouveau [Bates, 1949 ; Rioux, 1958 ; Pratt, 1959 ; Crans, 2004]. Récemment, Crans [2004] a mis au point une classification des culicidés nord-américains en se basant sur les critères de ses prédécesseurs (Bates et Pratt) et sur les informations relatives aux habitats larvaires. La classification de Crans permet de séparer les espèces aux biologies proches mais ne partageant pas les mêmes habitats.

Ces classifications ont été élaborées dans un but essentiellement didactique ; en particulier, celle de Crans est destinée aux étudiants et agents de terrain des organismes de démoustication. Elles permettent de décrire de façon synthétique la biologie de toutes les espèces qui partagent les mêmes types de cycle et d'habitats.

Notre démarche diffère de celle de Crans à la fois par la méthode utilisée et par son objectif exclusivement analytique. En effet, pour les classifications citées ci-dessus, les auteurs ont employé une méthode subjective et empirique fondée sur une expérience de terrain conséquente, alors que le manque de personnes ressources et l'intérêt récent pour une région relativement peu étudiée jusqu'à présent nous a amené à développer une approche combinant méthodes automatiques et subjectives. Ce type d'approche permet d'obtenir une bonne classification, adaptée au contexte local.

DISTRIBUTION DES UNITES FONCTIONNELLES

Une manière d'étudier la distribution des espèces est d'utiliser les cartes des indicateurs phytoécologiques des gîtes larvaires. Dans la région Rhône-Alpes, il n'existe pas de carte des indicateurs des gîtes larvaires basées sur la végétation. La réalisation de telles cartes est un travail de longue haleine qui doit être effectué à une échelle relativement fine raison pour laquelle ce travail ne peut être envisagé en première intention. Le découpage du paysage en UF et l'attribution de classes de moustiques à chaque UF sont alors une manière relativement simple de procéder. Plusieurs informations importantes pourraient d'ores et déjà en être déduites:

- La distribution des classes de moustiques dans la zone d'étude,
- La localisation de zones particulièrement diversifiées en termes de population culicidiennes,
- L'identification de zones hébergeant les classes comportant des espèces d'importance sanitaire.

PHENOLOGIE ET SAISONNALITE

L'utilisation de données concernant l'espèce représentative d'une classe pour étudier la phénologie des espèces de la même classe présente des limites. En effet, la classification proposée dans cet article ne tient pas compte

du critère temporel. Or, si les espèces appartenant à la même classe ont le même type de cycle biologique et sont présentes dans les mêmes biotopes, elles ne le sont pas nécessairement en même temps et peuvent ne jamais cohabiter, il existe une chronologie. Donc, pour l'étude phénologique, cette classification ne peut pas être utilisée directement. Il faudrait y ajouter une valence temporelle afin de créer de nouvelles classes, où l'espèce représentative aurait une phénologie similaire ou proche de celle des espèces de sa classe. Ce représentant serait alors un bon sujet pour l'étude de la phénologie d'espèces moins bien connues.

Outre les applications précédemment citées et la réduction du nombre de sujets d'étude qu'elle permet, la classification présenterait un autre intérêt non négligeable : l'étude d'une classe pourrait permettre de s'intéresser, indirectement, à une espèce que nous n'aurions pas retenue initialement. Ainsi, l'étude de cinq classes (classes 1, 5, 6, 8, 13) peut permettre d'obtenir des informations sur, *a priori*, 17 espèces.

Dans le but de vérifier le bien fondé de notre démarche, et avant toute application, le tableau de classification et les associations 'UF - classes - espèces' devront être testés et validés à partir de données de terrain de la zone d'étude. Ceci constitue la prochaine étape de travail [Pradel *et al.*, 2007b].

V - CONCLUSION

Nous sommes parvenus à identifier les espèces semblant être les plus importantes à prendre en considération dans une région qui était peu étudiée mais dont l'intérêt grandit dans le contexte climatique actuel. La démarche présentée est relativement simple :

- Une enquête entomologique de terrain permet de compléter les données rares ou éparées et d'estimer l'abondance des espèces dans la région ;
- Une étude bibliographique permet d'estimer l'implication potentielle des espèces dans la transmission de maladie.

L'utilisation de deux critères (abondance et susceptibilité de constituer des vecteurs de maladies) associée à la classification bio-

écologique des espèces permet de restreindre notablement le nombre de sujets d'études en s'intéressant à des classes d'espèces et non uniquement aux espèces.

En outre, la classification, élaborée dans un but analytique, a pour objectif de servir d'outil à deux applications. D'une part, elle permettrait de déterminer les « unités fonctionnelles » productrices de certaines classes de moustiques et d'en étudier la répartition spatiale dans un environnement donné. D'autre part, la prise en compte de la notion de temps pourrait permettre d'étudier la dynamique des populations, en particulier la saisonnalité de certains aspects de leur biologie susceptibles d'influer sur la capacité vectorielle.

Après application dans la zone d'étude et validation, cette méthode de classification relativement simple pourrait être adoptée et utilisée dans d'autres régions semblant présenter de bonnes conditions pour la circulation d'arboviroses (présence d'habitats favorables aux différents acteurs du cycle épidémiologique considéré, d'hôtes et de réservoirs potentiels, de zones humides favorables au développement des moustiques).

Le travail présenté ici s'inscrit dans un cadre plus global de l'étude de l'impact des changements environnementaux sur les populations culicidiennes de la région. Nous disposons de peu de connaissances relatives au sens et à l'amplitude des changements à venir et, encore moins, aux capacités d'adaptation des différentes espèces de moustiques. Néanmoins, on peut penser que les espèces rares et peu répandues seront plus sensibles aux changements environnementaux que les espèces plus abondantes et ubiquistes, *a priori* plus robustes. Dans un souci de simplification, nous avons tenu compte pour chaque espèce des stratégies les plus couramment rencontrées, en négligeant celles qui sont minoritaires. Or,

celles-ci pourront constituer un atout si l'environnement change en conférant à l'espèce une certaine plasticité écologique qui leur permettra de s'adapter aux changements. La diversité des stratégies dans les cycles biologiques reflète une adaptation des espèces à leur environnement [Becker, 1989]. Et, la prise en compte de ces stratégies, pour le moment marginales, devrait être envisagée dans une classification plus élaborée.

La prochaine étape du travail consistera à tenter de définir des indicateurs entomologiques pertinents qui constitueraient des révélateurs des changements environnementaux en cours ou à venir et, contribueraient à estimer le risque de survenue de maladies vectorielles. Si de tels indicateurs parvenaient à être identifiés, leur inclusion dans un système de surveillance entomologique ciblé pourrait être envisagée.

Enfin, des études virologiques et de laboratoire complémentaires, comme l'étude de la compétence vectorielle des populations locales vis-à-vis de certains virus, permettraient i/ de donner un éclairage nouveau à ce stade du travail et ii/ de conforter ou non le choix que nous avons fait des espèces à étudier.

BIBLIOGRAPHIE

- Balenghien T. - De l'identification des vecteurs du virus West Nile à la modélisation du risque d'infection dans le sud de la France. Grenoble 1, Université Joseph Fourier, 223 pages, 2006.
- Balenghien T., Vazeille M., Grandadam M. *et al.* - Vector competence of some French *Culex* and *Aedes* for West Nile Virus. *Emerg. Infect. Dis.*, 2007, *submitted*.
- Balenghien T., Vazeille M., Reiter P. *et al.* - Evidence of the laboratory Vector Competence of *Culex modestus* Ficalbi for West Nile Virus. *J. Am. Mosq. Control Assoc.*, 2007, **23**, in press.
- Bates M. - The natural history of mosquitoes, 379 pages. Ed. The Macmillan CO., New York, 1949.
- Becker N. - Life strategies of mosquitoes as an adaptation to their habitats. *Bull. Soc. Vector Ecol.*, 1989, **14** (1), 6-25.
- Becker N., Zgomba M., Petric D. *et al.* - Mosquitoes and their control, 158 pages. Ed. Kluwer Academic / Plenum Publishers, London, 2003.
- Blitvich B.J., Fernandez-Salas I., Contreras-Cordero J. F. *et al.* - Serologic Evidence of West Nile Virus Infection in Horses, Coahuila State, Mexico. *Emerg. Infect. Dis.*, 2003, **9** (7), 853-856.
- Chippaux A., Rageau J., Mouchet J. - Hibernation de l'arbovirus Tahyna, chez *Culex modestus* fic. en France. *C. R. Acad. Sci. Paris série D.*, 1970, **270**, 1648-1650.
- Clements A.N. - The modification of adult behaviour by geophysical and climatic factors. *In*: The biology of mosquitoes, Vol. 2. Sensory reception and behaviour. Clements AN., Ed. CABI Publishing, London, 1999, 263-286.

- Cornel A.J., Jupp P.G., Blackburn N.K. - Environmental temperature on the vector competence of *Culex univittatus* (Diptera: Culicidae) for West Nile virus. *J. Med. Entomol.*, 1993, **30** (2), 449-456.
- Crans W.J. - A classification system for mosquito life cycles: life cycle types for mosquitoes of the northeastern United States. *J. Vector Ecol.*, 2004, **29** (1), 1-10.
- Deubel V., Gubler D.J., Layton M. *et al.* - West Nile Virus: A Newly Emergent Epidemic Disease. *Emerg. Infect. Dis.*, Supplement Jun, 2001, **7** (3), 536.
- Durand B., Dauphin G., Labie J. *et al.* - Résultat d'une enquête sérologique sur l'infection à virus West Nile chez les équidés dans le Var, en 2003. *Environnement Risque et Santé*, 2005, **4** (2), 114-118.
- Dohm D., O'Guinn M., Turell M. - Effect of environmental temperature on the ability of *Culex pipiens* (Diptera: Culicidae) to transmit West Nile virus. *J. Med. Entomol.*, January, 2002, **39** (1), 221-225.
- Dow R.P., Gerrish G.M. - Day-to-day change in relative humidity and the activity of *Culex nigripalpus* (Diptera: Culicidae). *J. Med. Entomol.*, July, 1970, **63** (4), 994-999.
- Epstein, P. - Climate change and emerging infectious diseases. *Microbes Infect.*, 2001, **3** (9), 747-757.
- Estrada-Franco J.G., Navarro-Lopez R., Beasley D.W.C. *et al.* - West Nile Virus in Mexico: Evidence of Widespread Circulation since July 2002. *Emerg. Infect. Dis.*, 2003, **9** (12), 1604-1607.
- Fonseca D., Keyghobadi N., Malcolm CA. *et al.* - Emerging vectors in the *Culex pipiens* complex. *Science*, 2004, **303** (5663), 1535-1538.
- Fyodorova M., Savage H, Lopatina JV. *et al.* - Evaluation of potential West Nile virus vectors in Volgograd region, Russia, 2003 (Diptera: Culicidae): species composition, bloodmeal host utilization, and virus infection rates of mosquitoes. *J. Med. Entomol.*, 2006, **43** (3), 552-563.
- Hales S., De Wet N., Maindonald J. *et al.* - Potential effect of population and climate changes on global distribution of dengue fever: an empirical model. *Lancet*, 2002, **360** (9336), 830-834.
- Hannoun C., Panthier R., Corniou B. - Isolation of Tahyna virus in the South of France. *Acta Virol.*, 1966, **10** (4), 362-364.
- Kilpatrick A., Kramer L., Campbell SR. *et al.* - West Nile virus risk assessment and the bridge vector paradigm. *Emerg. Infect. Dis.*, 2005, **11** (3), 425-429.
- Lena, E. Bureau, S. Reynard *et al.*, Enquête sérologique pour le virus West Nile dans l'avifaune de la Dombes (Ain) en 2001: Absence de mise en évidence d'une circulation virale. *Revue Méd. Vét.*, 2006, **157** (12), 614-620.
- Lefrançois T., Blitvich B., Pradel J. *et al.* - West Nile virus in Guadeloupe: introduction, spread, and decrease in circulation level: 2002-2005. *Ann. N. Y. Acad. Sci.*, 2006, **1081**, 206-215.
- Lundstrom J. - Mosquito-borne viruses in western Europe: a review. *J. Vect. Ecol.*, 1999, **24** (1), 1-39.
- Murgue B., Murri S., Zientara S. *et al.* - West Nile Outbreak in Horses in Southern France, 2000: The Return after 35 Years. *Emerg. Infect. Dis.*, 2001, **7** (4), 692-696.
- O'Leary D.R., Marfin A.A., Montgomery S.P. *et al.* - The epidemic of West Nile virus in the United States, 2002. *Vector borne and zoonotic diseases*, 2004, **4** (1), 61-70.
- Patz J.A., Campbell-Lendrum D., Holloway T. *et al.* - Impact of regional climate change on human health. *Nature*, 2005, **438**, 310-317.
- Petersen L.R., Roehrig J.T. - West Nile Virus: A Reemerging Global Pathogen. *Emerg. Infect. Dis.*, 2001, **7** (4), 611-614.
- Pradel J. *et al.* - Contribution to phenology and habitat characterization of mosquitoes in humid areas in Rhone-Alpes region, France, 2007a. *In progressa*.
- Pradel J. *et al.* - A bio ecological-based framework for classifying mosquitoes, putative vectors of arboviruses: application to Rhône-Alpes region, France, 2007b. *In progressa*
- Pratt H.D. - A new classification of the life histories of North American mosquitoes. *Proc. NJ Mosquito Exterm. Assoc.*, 1959, **46**, 148-152.
- Purse B., Mellor P., Rogers DJ. *et al.* - Climate change and the recent emergence of bluetongue in Europe. *Nat. Rev. Microbiol.*, 2005, **3** (2), 171-181.

- Reiter P. - Weather, vector biology and arboviral recrudescence. *In*: The Arboviruses: Epidemiology and Ecology, Monath, TP., (Ed.) Boca Raton (FL): CRC Press. Vol 1, 1988, 245-55.
- Rhodain F., Perez C. - Précis d'entomologie médicale et vétérinaire, 458 pages. Ed. Maloine, Paris, 1985.
- Rioux J.A. - Les culicidés du "Midi" méditerranéen. Etude systématique et écologique, 3003 pages. Paris, Paul Lechevalier, 1958.
- Savage H., Ceianu C., Nicolescu G. *et al.* - Entomologic and avian investigations of an epidemic of West Nile fever in Romania in 1996, with serologic and molecular characterization of a virus isolate from mosquitoes. *Am. J. trop. Med. Hyg.*, 1999, **61** (4), 600-611.
- Schaffner F., Angel G., Geoffroy B. *et al.* - Les moustiques d'Europe, CD-Rom. Ed. IRD and EID Méditerranée, Paris, 2001.
- Turell M.J., O'Guinn M. and Oliver J. - Potential for New York mosquitoes to transmit West Nile Virus. *Am. J. Trop. Med. Hyg.*, 2000, **62** (3), 413-414.
- Zell R. - Global climate change and the emergence/re-emergence of infectious diseases. *Int. J. Med. Microbiol.*, 2004, **293** (Suppl 36), 16-26.
- GIEC-1 Contribution du groupe de travail I au quatrième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Bilan 2007 des changements climatiques : Les bases scientifiques physiques. Résumé à l'intention des décideurs. Traduction provisoire et non officielle du 2 février 2007. Disponible à l'adresse : http://www.effet-de-serre.gouv.fr/groupe_de_travail_i_du_giec_2007
- GIEC-2 - Contribution du Groupe de travail II au quatrième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Bilan 2007 des changements climatiques : Impacts, adaptation et vulnérabilité. Résumé à l'intention des décideurs. Traduction provisoire et non officielle du 18 avril 2007. Disponible à l'adresse : <http://www.effet-de-serre.gouv.fr/images/documents/AR4%20SPM%20GR2%20FR%2007-04-18.pdf>

