



**HAL**  
open science

# Biodiversité et moustiques face au changement climatique et à la mondialisation - Impacts sur la santé en France métropolitaine

Elise Mourot

► **To cite this version:**

Elise Mourot. Biodiversité et moustiques face au changement climatique et à la mondialisation - Impacts sur la santé en France métropolitaine. Sciences du Vivant [q-bio]. 2020. dumas-02938675

**HAL Id: dumas-02938675**

**<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-02938675v1>**

Submitted on 15 Sep 2020

**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.

**U.F.R. DES SCIENCES PHARMACEUTIQUES**

Année 2020

Thèse n°76

THESE POUR L'OBTENTION DU

**DIPLOME D'ETAT de DOCTEUR EN PHARMACIE**

Présentée et soutenue publiquement

Par Elise MOUROT

Née le 24 Février 1993 à Lesparre-Médoc

Le 10 Juillet 2020

**Biodiversité et moustiques face au changement  
climatique et à la mondialisation**

**Impacts sur la santé en France métropolitaine**

Sous la direction du  
Dr Stéphanie CLUZET

Membres du jury :

Mme. CLUZET Stéphanie  
M. DECENDIT Alain  
M. DUFRENNE Marc

Présidente / Directrice de thèse  
Examinateur  
Examinateur



## Remerciements

A ma directrice et présidente de thèse,

Madame Stéphanie Cluzet, Maitre de conférences à l'UFR de Pharmacie de l'université de Bordeaux, pour m'avoir fait l'honneur de diriger et présider le jury de cette thèse, ainsi que pour vos conseils toujours réactifs et avisés, je vous remercie. J'ai apprécié particulièrement votre suivi bienveillant.

A mes membres du jury,

Monsieur Alain Decendit, Maitre de conférences à l'UFR de Pharmacie de l'université de Bordeaux, pour avoir accepté de prendre part au jury, je vous remercie.

Monsieur Marc Dufrenne, Docteur en pharmacie, pour avoir accepté de prendre part à ce jury de thèse, pour votre encadrement très formateur durant mon stage de 6<sup>ème</sup> année et votre grande gentillesse. Veuillez trouver ici l'expression de mes sincères remerciements, ainsi qu'à toute l'équipe officinale avec qui j'ai eu le plaisir d'enrichir mes connaissances sur le métier de pharmacien.

Au professeur de l'ombre,

Monsieur Gilbert Haumont, Maitre de conférences en parasitologie à l'UFR de Pharmacie de l'université de Bordeaux à la retraite depuis 2015, également très impliqué concernant les interrogations liées aux changements climatiques, que j'ai eu comme professeur pendant mon cursus universitaire. Pour votre bienveillance sans faille et vos précieux conseils, merci infiniment de m'avoir confortée et rassurée dans le choix et l'évolution de cette thèse. Sans vous ce projet n'aurait pu voir le jour, je vous remercie donc du fond du cœur. Merci également à Jocelyne qui a permis cette belle rencontre.

Mes remerciements vont également,

A ma famille,

Mes grands-parents pour leur attention et leur soutien pendant toutes mes années étudiantes. Merci à mes parents et tout particulièrement à ma mère pour le temps

passé à me supporter et m'encourager dans l'accomplissement de cette thèse.  
Mon petit frère, parce qu'il faut citer toute la famille pour représenter la biodiversité, merci d'avoir été là dans les bons comme dans les mauvais moments. Et merci de m'avoir fait l'honneur de t'amener pêcher pour me rendre compte de l'effet des moustiques en milieu naturel.

A mes amis de faculté de pharmacie,

Sans vous mes années étudiantes n'auraient pas été aussi palpitantes.

Merci aux copains de l'association ACEPB, aux faluchards, à mes beaux parrains et marraine Adrien, Marie et Olivier, aux splendides fillots et fillottes Camille, Iveta, Sébastien, Charles et Adrien, et toutes les autres personnes que j'ai eu l'honneur de côtoyer. Ces moments de partage et de convivialité ont contribué à organiser et aider à apprécier l'intensité des études.

Merci à Bettina, mon binôme de travaux pratiques, qui m'a permis d'étudier en mêlant rigueur et bonne humeur.

Merci à mes deux acolytes de promo, Rémi et Sandra, pour votre soutien moral sans faille pendant ces années de faculté, ces révisions intenses à la bibliothèque, et surtout tous ces magnifiques moments en votre compagnie.

A mes amis et colocataires qui m'ont apporté de la joie et m'ont épaulés dans les périodes difficiles, un énorme merci à Chloé, Léo, Laura, Marie, Jonathan, Brian, et tous les autres.

## Table des matières

<b>Introduction</b> .....	9
Chapitre I - La biodiversité et la santé .....	12
1 - Définition .....	12
2 - Un équilibre, notre protection .....	14
a - Effet de dilution .....	14
b - Résilience.....	16
c - Résistance .....	17
3 - Biodiversité, pilier de la vie de l'Homme .....	22
a - Besoins primaires.....	22
b - Protection des risques.....	23
c - Emerveillement .....	24
d - Innovation.....	24
e - Valeur économique .....	25
Chapitre II - Les moustiques et leur place dans la biodiversité .....	28
1 - Le moustique .....	28
a - Classification .....	28
b - Répartition.....	28
c - Le cycle biologique, les différentes phases de vie du moustique .....	29
d - Les moustiques et leur rôle de vecteur.....	32
e - « Stratégies » du moustique.....	33
2 - Place dans la biodiversité .....	33
a - Ressource alimentaire.....	34
b - Assainissement de l'eau en zone humide et pollinisation.....	34
c - Régulation de la population humaine ? .....	35
d - Une espèce dispensable ? .....	35
3 - Impact du réchauffement climatique sur les moustiques .....	36
4 - Modèles prédictifs d'une population .....	40
5 - Le moustique tigre <i>Aedes albopictus</i> en France.....	42
6 - Risques vectoriels du moustique tigre .....	45
Chapitre III - Prévention des maladies transmises par les moustiques .....	48
1 - Protections individuelles, conseils du pharmacien.....	48
a - Protection physique.....	48
b - Répulsifs cutanés : protection chimique .....	49
c - Répulsifs en aromathérapie .....	53
d - Insecticides .....	54

e -	Autres techniques pour repousser les moustiques.....	55
f -	Pistes de recherche.....	56
2 -	Protection collective.....	59
a -	Action sur l'environnement.....	59
b -	Education sanitaire.....	60
c -	Lutte chimique conventionnelle .....	61
d -	Lutte biologique.....	62
e -	Gestion de la lutte anti-vectorielle et évaluation continue en France .....	64
Chapitre IV -	Incidence de l'évolution du climat en métropole et des échanges	
mondiaux	67	
1 -	Évolution du climat en métropole et développement des échanges.....	67
a -	Le changement climatique .....	67
b -	Evolution des échanges mondiaux.....	73
2 -	Conséquences au niveau de la santé humaine .....	75
a -	Changement climatique et développement .....	75
b -	Echanges mondiaux et interactions sociales.....	77
3 -	Approche globale.....	79
	<b>Conclusion</b> .....	82
<b>ANNEXE 1 :</b>	Sous-familles de moustiques d'après « The Culicidae (Diptera): a review of taxonomy, classification and phylogeny », RALPH E. HARBACH, 2007 (111).....	93
<b>ANNEXE 2 :</b>	Nombre de signalements et de cas importés de chikungunya, dengue et d'infections à virus Zika notifiés dans les 42 départements colonisés par <i>Aedes albopictus</i> , France métropolitaine, 01 mai-30 novembre 2018 (66).....	95
<b>ANNEXE 3 :</b>	Répulsifs recommandés pour la protection contre les piqûres d'arthropodes (hors araignées, scorpions, scolopendres et hyménoptères) : composition, nom commercial, présentation et mode d'utilisation d'après le HCSP au 24 avril 2015. (112).....	96
<b>ANNEXE 4 :</b>	Principales huiles essentielles répulsives et leur spectre d'action (74).	98
<b>ANNEXE 5 :</b>	Plaquettes d'information pour le grand public (113) (114) (115).....	99

## Table des illustrations

Figure 1. Le concept de biodiversité s'applique à l'ensemble constitué par la diversité génétique, la diversité des espèces et la diversité écologique, ainsi qu'à ses interactions (4).....	12
Figure 2. Le mécanisme de l'effet de dilution (9).....	15
Figure 3. Résilience d'un écosystème (10).....	17
Figure 4. Résistance d'un écosystème (10).....	17
Figure 5. La biodiversité augmente la résistance de la productivité d'un écosystème soumis à des événements climatiques extrêmes (12).....	19
Figure 6. Effets de la biodiversité sur les mesures de stabilité avec des événements climatiques définis sur des durées plus ou moins longues (12).....	20
Figure 7. Productivité pendant et après divers événements climatiques (très sec, moyennement sec, normal, modérément humide et très humide) pour des monocultures et cultures de 16 espèces (12).....	21
Figure 8. Liens entre services d'origine écosystémique et bien-être de l'Homme.....	26
Figure 9. Cycle de vie du moustique d'après Alerte aux moustiques? de Frédéric Simard (29).....	31
Figure 10. Différentes étapes d'infection du moustique par un arbovirus (34).....	32
Figure 11. Diagramme des interactions entre des variables climatiques, les vecteurs et les virus (47).....	37
Figure 12. Effet de l'élévation de température avec +1°C, +3°C et +5°C en fonction des saisons a = printemps, b = été, c = automne, d = hiver, sur la population d' <i>Aedes albopictus</i> à Canton, Chine. La partie grisée représente l'élévation de température. (49).....	38
Figure 13. Photographie d' <i>Aedes albopictus</i> (58).....	42
Figure 14. Présence du moustique tigre en métropole au 1er Janvier 2020 (59).....	43
Figure 15. Aire de distribution du moustique tigre en Europe en Janvier 2019 d'après Le Monde (60).....	43
Figure 16. Efficacité des moyens de prévention disponibles contre les piqûres de moustiques d'après le Haut Conseil de la Santé Publique 2019 (79).....	56
Figure 17. Systèmes de libération des molécules actives.....	58
Figure 18. Répartition des lieux de ponte d' <i>Aedes albopictus</i> (83).....	60
Figure 19. Evolution des températures moyennes annuelles en France métropolitaine depuis 1900 (96).....	68
Figure 20. Projections climatiques en France métropolitaine suivant différents scénarios (96).....	70
Figure 21. Simulations climatiques pour climat futur avec les scénarios d'évolution RCP 4.5 et 8.5 (96).....	71
Figure 22. Un sol de plus en plus sec en toute saison (96).....	72
Figure 23. Evolution du commerce et du PIB (Produit Intérieur Brut) entre 1980 et 2017 (99).....	74
Figure 24. Doublement du trafic aérien tous les 15 ans (100).....	74
Figure 25. Graphique du haut : nombre d'épidémies de maladies infectieuses de 1940 à 2018. Graphique du bas : trafic aérien de passagers de 1960 à 2017 (106).....	78
Figure 26. Approche systémique dynamique pour comprendre le risque de maladies transmises par les moustiques (MBD) d'après Lancet Infect Dis 2019 (55).....	80



## Table des abréviations

°C : degrés Celsius

ADN : Acide Désoxyribonucléique

ANSES : Agence Nationale de Sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'Environnement et du Travail

ARS : Agence Régionale de Santé

Bti : *Bacillus thuringiensis israelensis*

CE : Commission Européenne

cm : centimètre

CO<sub>2</sub> : dioxyde de carbone

DEET : *N,N*-diethyl-*m*-toluamide

DGS : Direction Générale de la Santé

EID : Entente Interdépartementale de Démoustication

FAO : Food and Agriculture Organization of the United Nations

FDA : Food and Drug Administration

GIEC : Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat

HCSP : Haut Conseil de la Santé Publique

HAS : Haute Autorité de Santé

PMD : *p*-menthane-3,8-diol

PMDRBO : PMD Rich Botanical Oil

RCP : Representative Concentration Pathways

mm : millimètre

UE : Union Européenne

## Introduction

La biodiversité est un large concept souvent difficile tant à cerner qu'à appréhender. De nombreuses ignorances demeurent quant à son fonctionnement, son évolution et ses répercussions sur nos vies aujourd'hui et surtout demain. Elle est au cœur de l'actualité ces dernières années.

La complexité de la biodiversité en fait sa force mais aussi sa fragilité. Une modification infime d'une interaction entre deux protagonistes garant d'un certain équilibre peut entraîner une réaction en chaîne et modifier complètement un écosystème. Les espèces vivant dans un écosystème entretiennent diverses relations, nocives pour certaines et bénéfiques pour d'autres, le tout restant dans un état relativement stable. L'espèce humaine, qui fait partie de cette biodiversité, influence énormément les diverses interactions existantes. De multiples phénomènes en sont la cause. Une des modifications les plus citées ces dernières années à cause de son impact mondial est le changement climatique. Celui-ci entraîne un changement extrêmement rapide et important des écosystèmes.

Afin de comprendre ce qu'est la biodiversité, nous aborderons dans un premier temps à travers une vision anthropocentrée tout ce que la biodiversité nous apporte, son rôle essentiel dans un développement pérenne de l'espèce humaine en bonne santé. Puis nous allons décrire les paramètres généraux l'influençant.

Ensuite nous traiterons d'insectes particuliers, peu appréciés par l'Homme si ce n'est par des entomologistes passionnés : les moustiques. Nous verrons qui sont-ils vraiment, leur place dans les écosystèmes ainsi que leurs tendances évolutives. Nous nous concentrerons sur une espèce invasive en particulier *Aedes albopictus* communément appelé moustique tigre. Ces diptères sont un bel exemple lié au changement des écosystèmes.

Puis nous développerons les divers moyens de lutte et les recommandations à prodiguer à la population générale pour limiter l'expansion de ces insectes, ainsi que les conseils pour s'en protéger. Nous verrons également comment est construite la

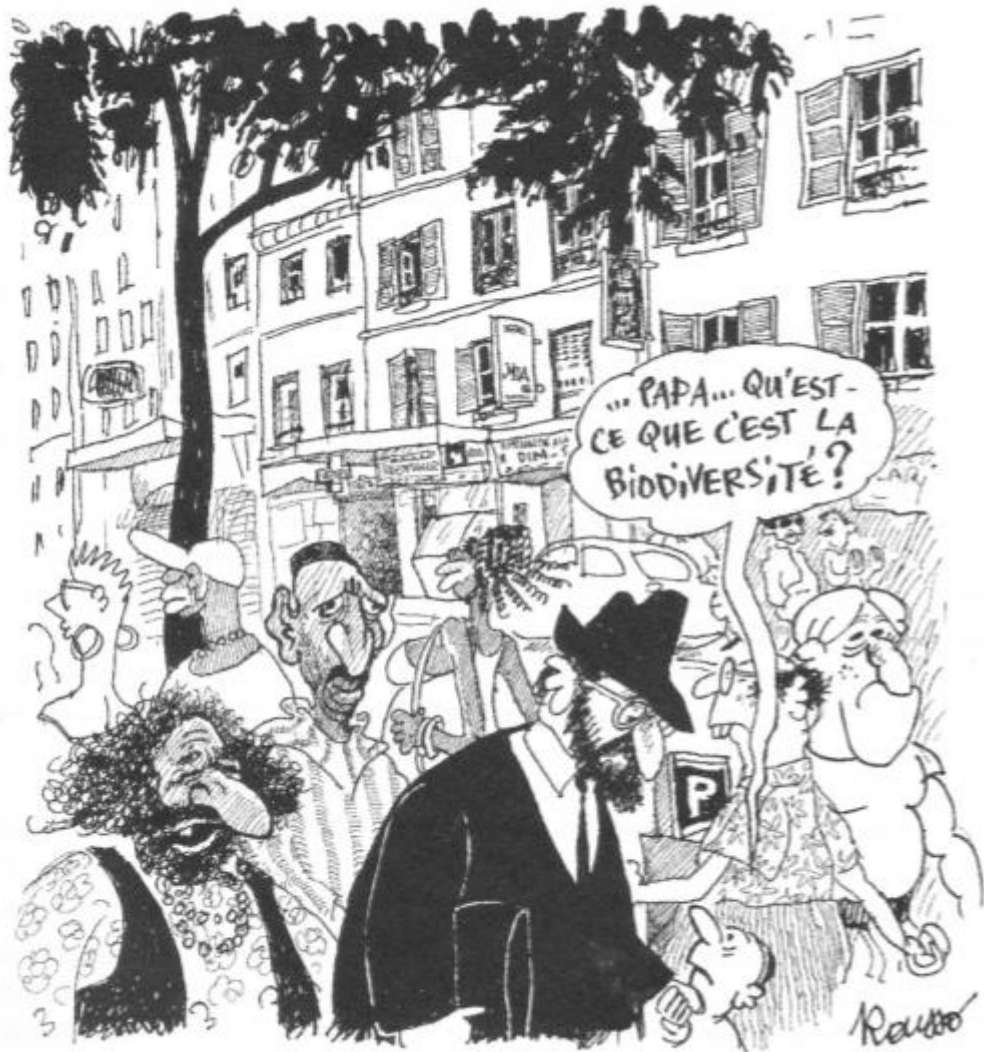
politique menée en France.

Enfin nous discuterons de l'évolution du changement climatique ainsi que des échanges mondiaux, et les conséquences possibles sur la santé humaine.

Ce fin équilibre va-t-il pouvoir rester longtemps en adéquation avec la vie humaine ? Difficile à présager. Des espèces invasives, parasitaires et autres vont-elles se répandre de façon exponentielle ? Quels conseils prodiguer aux patients à l'officine dans le cadre d'une santé publique ?

# CHAPITRE 1

## BIODIVERSITE ET SANTE DE L'HOMME



*Courrier de l'environnement de l'Inra n° 24*

## Chapitre I - La biodiversité et la santé

Le concept de biodiversité est relativement récent dans l'histoire de l'Homme. Le mot « biodiversity » est un néologisme provenant de la contraction des mots anglais « biological » et « diversity ». Il fait son apparition dans le titre d'un ouvrage de Edward O. Wilson en 1984. Puis il est médiatisé en 1992 avec le Sommet planétaire des Nations Unies sur l'environnement et le développement qui s'est tenu à Rio de Janeiro. (1) (2)

Le terme de biodiversité est largement utilisé aujourd'hui, mais savons-nous vraiment ce qu'il signifie ?

### 1 - Définition

La biodiversité biologique est l'ensemble des êtres vivants, micro-organismes, plantes, champignons et animaux. Elle englobe leur variabilité, diversité et pluralité. Ce sont aussi les interactions qui les relient entre eux et avec le milieu où ils vivent. C'est le tissu vivant de notre planète.

Elle se décline en trois composantes : la diversité génétique, la diversité spécifique et la diversité des écosystèmes (Fig. 1). L'ensemble de ces trois niveaux est nécessaire au maintien de la diversité biologique. (3)

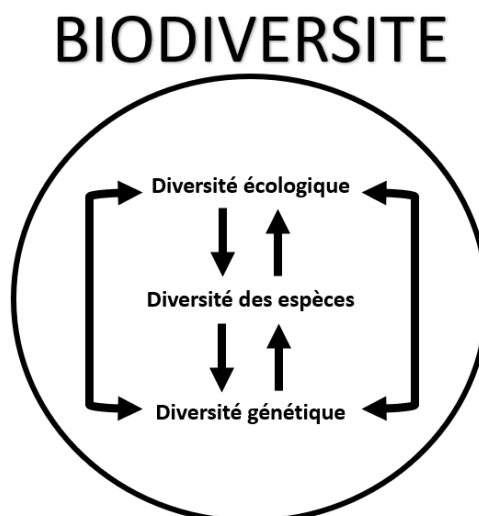


Figure 1. Le concept de biodiversité s'applique à l'ensemble constitué par la diversité génétique, la diversité des espèces et la diversité écologique, ainsi qu'à ses interactions (4)

Si on part du plus petit niveau, on trouve d'abord la diversité génétique. Elle correspond à la diversité des gènes et allèles codés par l'ADN au sein des individus d'une même espèce. Cette diversité génétique influence les caractères spécifiques d'un individu au sein de l'espèce comme la couleur du pelage ou encore la résistance à une maladie. Elle résulte des mutations génétiques et de la reproduction sexuée qui assure un brassage constant des gènes. Une importante diversité génétique permet à une espèce de s'adapter plus facilement aux changements environnementaux.

Ensuite vient la diversité spécifique, cela représente toutes les espèces vivantes dans une zone donnée. C'est l'élément le plus visible de la biodiversité, celui que l'on se représente facilement. Le nombre d'espèces connues avoisine les 1 800 000 dont 280 000 dans les mers et les océans mais on estime entre 5 et 30 millions le nombre d'espèces réelles.<sup>(5)(3)</sup> En effet, certains organismes sont difficiles à étudier comme les microorganismes : bactéries et champignons ou d'autres espèces résidant dans des contrées éloignées non explorées par l'Homme ou encore dans le sol.

Enfin on trouve la diversité des écosystèmes. C'est un ensemble de populations d'espèces différentes, formant des communautés ; qui interagissent entre elles et avec leur milieu ambiant (air, terre, eau...), constituant ainsi des écosystèmes. Une forêt, une mare, l'Homme et sa flore intestinale en sont des exemples. Les relations entre espèces qu'on y trouve sont diverses : chaîne alimentaire, parasitisme, symbiose, mutualisme, commensalisme, prédation... Ces interactions permettent plusieurs fonctions dont certaines positives comme la pollinisation, la dispersion, l'assainissement, etc. On comprend déjà que tout changement affectant une population se répercute sur les autres espèces avec lesquelles elle est en interaction et ainsi sur l'ensemble du réseau.

La biodiversité est donc un concept beaucoup plus vaste que la simple classification d'espèces animales et végétales à laquelle on est tenté de la réduire. C'est en réalité la diversité de la vie à tous ses niveaux d'organisation, du gène aux espèces et aux écosystèmes. Ces niveaux sont en perpétuelles interactions, c'est cette dynamique qui amorce l'évolution des êtres vivants. Même si elle n'est pas répartie uniformément, on la retrouve tout autour du globe, que ce soit sur terre ou dans les océans formant ainsi de multiples écosystèmes. Les hauts lieux de la biodiversité aussi appelés « hot spots » sont présents sur tous les continents. Ils représentent 2,3% des terres

émergées et accueillent 50 % des plantes vasculaires et 42 % des vertébrés terrestres. (6) On note une forte diversité dans les zones tropicales avec une grande richesse d'espèces.

« *Du sommet des montagnes au fond des océans, mais aussi de la diversité des paysages naturels aux variétés de fruits et légumes dans nos assiettes, la biodiversité est partout.* ». (7)

On associe communément une deuxième notion au terme biodiversité. C'est aussi la prise de conscience récente de la diversité biologique menacée. Ce concept très médiatique intègre à part entière l'Homme en tant qu'espèce biologique qui, du fait de ces interactions avec son environnement, devient la cause d'une érosion accélérée de son milieu. L'Homme est alors responsable dès lors et devant les futures générations de la préservation de cette biodiversité.

Une espèce survit en général entre 5 et 10 millions d'années, il y a en effet un perpétuel renouveau naturel, tel que l'avait compris Darwin. Pourtant ces dernières années tout le monde a entendu parler du rythme alarmant d'extinction des espèces, ce qui mène les scientifiques à évoquer une sixième extinction de masse. (8)

Nous nous rapporterons à la première définition dans la suite de cet écrit.

## 2 - Un équilibre, notre protection

### a - Effet de dilution

La biodiversité grâce à sa pluralité permet d'établir un équilibre entre les différents agents pathogènes et leurs hôtes qui vivent dans un même écosystème. En effet certaines espèces sont qualifiées d'hôtes réservoirs quand elles participent au cycle de transmission d'un agent pathogène donné, on dit aussi que ces espèces sont « compétentes » pour la maladie. A contrario d'autres espèces sont résistantes à la maladie et constituent une impasse pour sa transmission, c'est un « cul-de-sac » épidémiologique. L'hôte peut être infecté mais ne transmettra pas l'agent pathogène. Ces espèces sont dites « peu compétentes ». (9)

Prenons l'exemple d'une maladie vectorielle transmise par un moustique. Ce moustique transmet un agent pathogène à l'Homme ainsi qu'à deux autres espèces :

une compétente et une autre dite « cul-de-sac ». Cette dernière ne pourra pas transmettre la maladie et donc la transmission sera perdue pour le cycle de l'agent pathogène.

Dans un deuxième cas, imaginons que l'espèce qui était une impasse pour l'agent pathogène disparaisse. Le moustique a toujours autant besoin de nourriture. Il va se diriger vers les espèces restantes et l'Homme aura plus de probabilité de se faire piquer. La prévalence de la maladie augmente.

Ceci s'appelle l'effet de dilution : plus la diversité est importante moins le risque de transmission de l'agent pathogène est élevé.

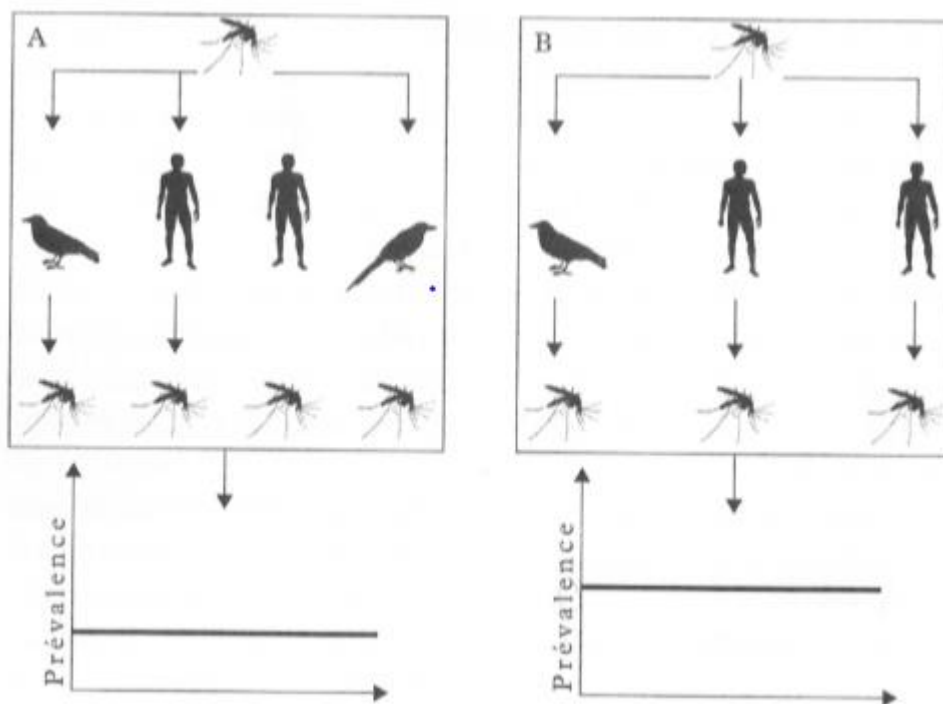


Figure 2. Le mécanisme de l'effet de dilution (9)

Lorsque le moustique se nourrit sur une espèce ne pouvant pas transmettre la maladie (comme par exemple l'oiseau de droite dans la Fig.2), un certain nombre de ses piqûres « est perdu » pour la transmission de l'infection.

Si cette espèce est absente, les piqûres précédemment perdues sont détournées sur les autres espèces capables de transmettre la maladie, augmentant la proportion de moustiques infectés et donc les cas humains.

Voici quelques exemples du phénomène de dilution. La maladie de Lyme en Amérique du Nord a une prévalence de 20 000 nouveaux cas humains par an ; elle est transmise par une espèce de tique à des petits mammifères ainsi qu'à l'Homme. (9) Les états américains les plus touchés par la maladie sont ceux comportant la plus faible diversité



de petits mammifères. Citons également la fièvre du Nil occidental transmise par des espèces de moustiques à plusieurs espèces d'oiseaux et parfois à l'Homme. Cette maladie, originaire de l'Afrique de l'Est, est apparue en 1999 dans l'état de New York. Elle s'est ensuite diffusée dans toute l'Amérique du Nord et comptabilise 600 décès par an. (9) C'est en Louisiane qu'on compte le moins de cas, c'est également l'état qui comporte la plus forte diversité d'oiseaux.

Les interactions entre les espèces animales sont extrêmement nombreuses et variées. Il est difficile de prévoir ce qui va se passer si on ajoute une nouvelle espèce dans un environnement. On peut vouloir diminuer la prévalence d'une maladie en ajoutant une espèce peu compétente, mais rien ne nous assure qu'elle ne va pas engendrer l'apparition d'une autre pathologie ou perturber l'équilibre d'autres espèces autochtones et alors créer une érosion de la biodiversité.

Lorsqu'une population ou espèce subit un changement, cela se répercute sur les autres espèces avec lesquelles elle est en interaction, et donc possiblement sur tout un écosystème.

Le meilleur moyen de préserver cet équilibre est de garder la biodiversité initiale en bonne santé sans modifier son évolution.

#### b - Résilience

En physique la résilience exprime la capacité de résistance d'un corps ou d'un matériau à un choc ou à une déformation. En écologie Holling en a donné une définition : c'est la capacité d'un système à absorber les perturbations et se réorganiser tout en opérant des changements de manière à garder essentiellement les mêmes fonctions, structures, identité et rétroactions. (10)

La résilience d'un système est donc sa capacité à récupérer un développement normal après avoir subi un traumatisme. Ce n'est pas un retour à l'état initial mais une adaptation du milieu ou d'une espèce après un grave événement perturbateur.

La Figure 3 schématise la différence entre une faible et une forte résilience. Le système avec une forte résilience retrouve plus rapidement son état initial à la suite d'une perturbation par rapport au système avec une résilience faible.

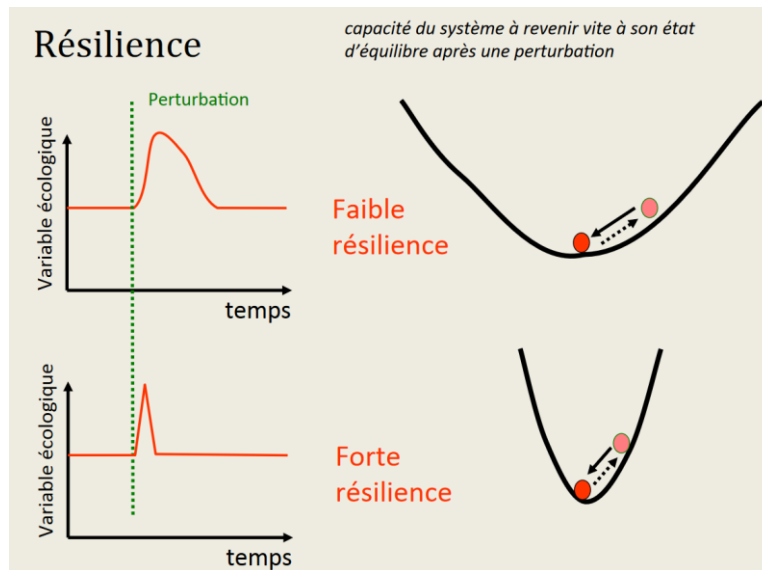


Figure 3. Résilience d'un écosystème (10)

### c - Résistance

En écologie, on définit la résistance comme la capacité d'un système à rester fondamentalement inchangé lorsqu'il est soumis à une perturbation. La Figure 4 illustre la différence entre un système à faible ou forte résistance. Le système avec une forte résistance n'a peu ou pas de modification de son état d'équilibre après une perturbation. Alors que le système avec une faible résistance verra son équilibre modifié plus drastiquement à la suite d'une perturbation de même intensité. (11)

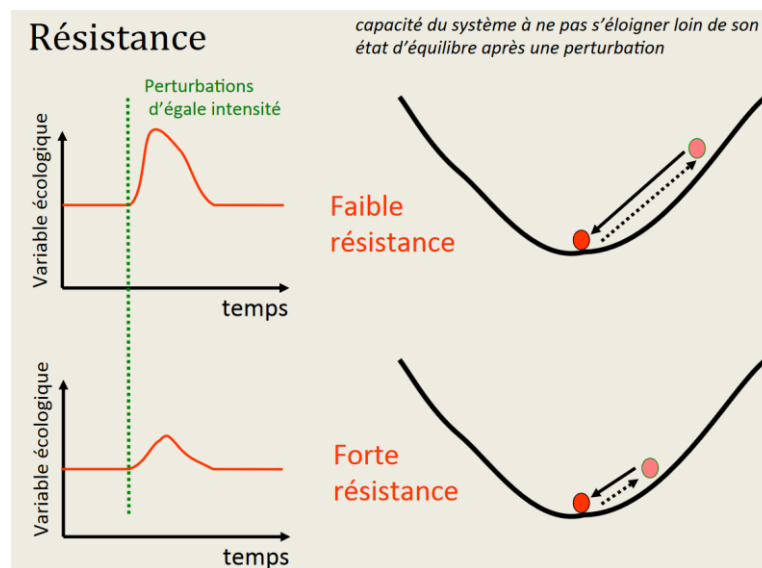


Figure 4. Résistance d'un écosystème (10)

Les milieux comprenant une forte biodiversité ont tendance à mieux supporter un stress environnemental par rapport aux milieux pauvres en biodiversité. C'est ce que montre une étude publiée en 2015 dans la revue Nature. (12) Dans celle-ci, ont été rassemblées les données de 46 études expérimentales qui ont porté sur la diversité des plantes et leur productivité selon les parcelles considérées. Cela a permis de connaître l'effet de plusieurs paramètres, comme celui de conditions climatiques extrêmes (sécheresse, forte humidité par exemples) en fonction de la biodiversité présente.

Pour exemple, les auteurs de cette revue rapportent que, selon les stress climatiques et le niveau de biodiversité des parcelles de prairies, leur productivité change. Après avoir subi des événements stressants, les communautés de plantes avec une faible diversité comptant une ou deux espèces, ont accusé des changements de productivité d'environ 50 %. Alors que les prairies avec une grande diversité de plantes (comptant entre 16 et 32 espèces) sont plus résistantes : les auteurs ont relevé en moyenne une variation de productivité de 25 %. La biodiversité augmente la résistance (soulignée par la productivité) des prairies que cela soit lors d'événements climatiques chauds ou froids ou encore de faible ou forte intensité (Fig.5).

Les auteurs se sont intéressés à la répercussion de la durée des événements climatiques sur la biodiversité. Pour un événement climatique durant entre 3 et 24 mois, la résistance reste stable que ce soient des climats chauds ou froids. En revanche la résilience varie en fonction de la durée et de la perturbation climatique : chaude ou humide (Fig.6).

Toutefois, un an après chaque événement climatique, la productivité des écosystèmes a souvent retrouvé voire dépassé les niveaux normaux dans les communautés à forte et à faible diversité biologique. Selon les événements climatiques observés dans l'étude, la biodiversité n'a pas un impact majeur sur le rétablissement de la productivité des prairies étudiées, soit dans la résilience des écosystèmes (Fig.7). De plus, la productivité a tendance à diminuer pendant les périodes de sécheresse et à augmenter lors des événements humides (Fig.7 graphique du haut).

Il y a d'autres facteurs environnementaux à prendre en compte, comme la disponibilité des nutriments ou l'abondance des prédateurs. En effet après une saison de forte productivité, les sols peuvent être appauvris en nutriments et donc la récolte de l'année suivante en être diminuée. Les herbivores ayant pu trouver facilement de la nourriture ont vu leur population augmenter, ce qui engendre possiblement un plus grand nombre

de prédateurs, et donc une productivité plus faible car déjà consommée. (Fig.7 graphique du bas)

Les résultats de l'étude suggèrent donc que la biodiversité stabilise principalement la productivité des écosystèmes, en augmentant la résistance aux événements climatiques modérés et extrêmes (sécheresse, forte humidité) (12). Cependant il n'a pas été mis en évidence que la biodiversité impacte la résilience des systèmes. D'autres études complémentaires seraient intéressantes pour confirmer cela.

Les changements environnementaux, dont certains sont la conséquence de l'activité humaine, entraînent la perte de biodiversité et semblent donc susceptibles de diminuer la stabilité des écosystèmes en diminuant leur résistance.

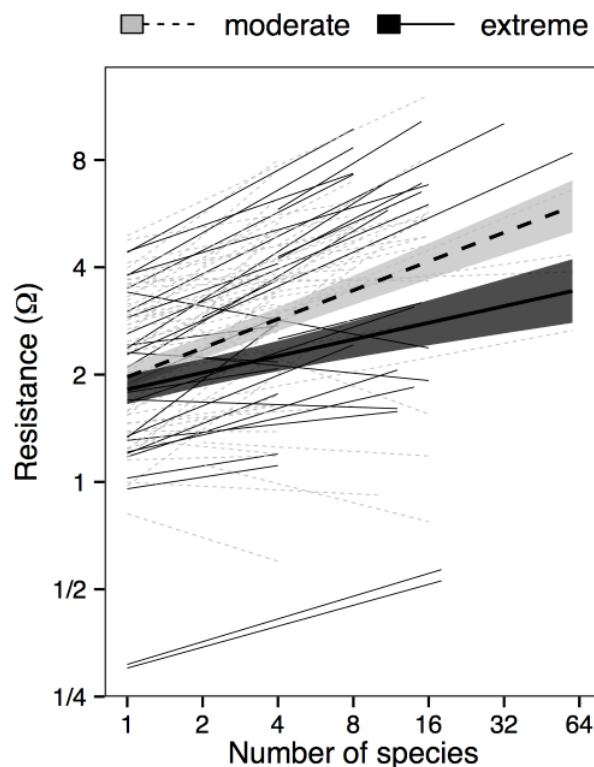


Figure 5. La biodiversité augmente la résistance de la productivité d'un écosystème soumis à des événements climatiques extrêmes (12)

Les courbes noire et grise claire représentent la résistance de la biodiversité en fonction du nombre d'espèces dans des conditions climatiques extrêmes pour la noire, et modérées pour la grise claire. Lorsqu'une seule espèce est présente, on note une résistance d'environ 2, ce qui correspond à un changement de productivité d'environ 50 %. Tandis qu'avec 64 espèces présentes la résistance est aux alentours de 3 dans les conditions climatiques extrêmes et 4 pour des conditions modérées, soit un changement de productivité de 25 %.

Dans les deux cas, plus le nombre d'espèces initialement présentes dans un milieu est grand, plus la résistance et donc la productivité de ce même milieu augmente.

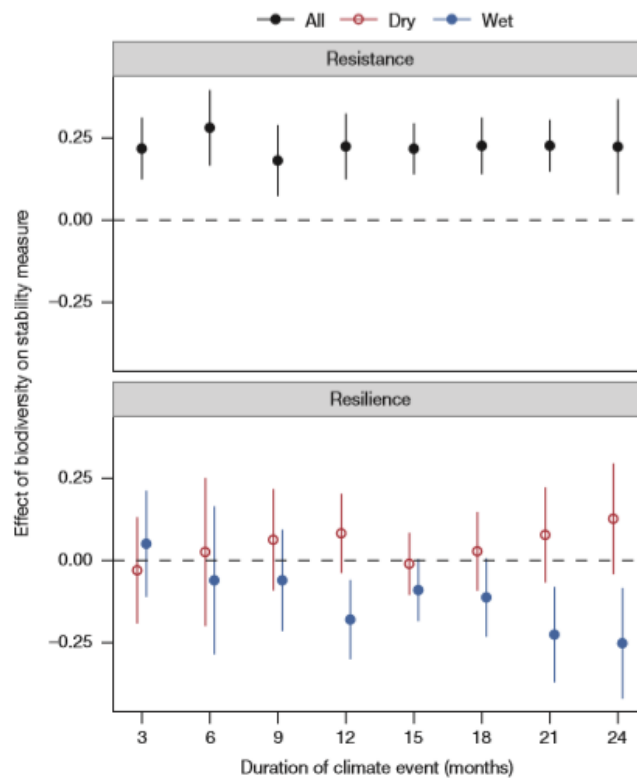


Figure 6. Effets de la biodiversité sur les mesures de stabilité avec des événements climatiques définis sur des durées plus ou moins longues (12)

La stabilité de la biodiversité en fonction de la durée des événements climatiques chauds ou froids dans le temps (de 3 à 24 mois) a été mesurée. Deux paramètres ont été observés : la résistance dans la figure en haut et la résilience pour la figure du bas. Les différents points alignés montrent une résistance stable peu importe les événements climatiques subis et la durée de ces derniers. En revanche les relevés de la résilience varient en fonction des événements climatiques subis (chauds ou froids), ainsi qu'en fonction de leur durée.

La biodiversité semble augmenter la résistance au cours de divers changements de climat, peu importe leur durée (de 3 à 24 mois). Cependant elle ne semble pas avoir d'effet significatif sur la résilience de la productivité d'un écosystème après divers événements climatiques.

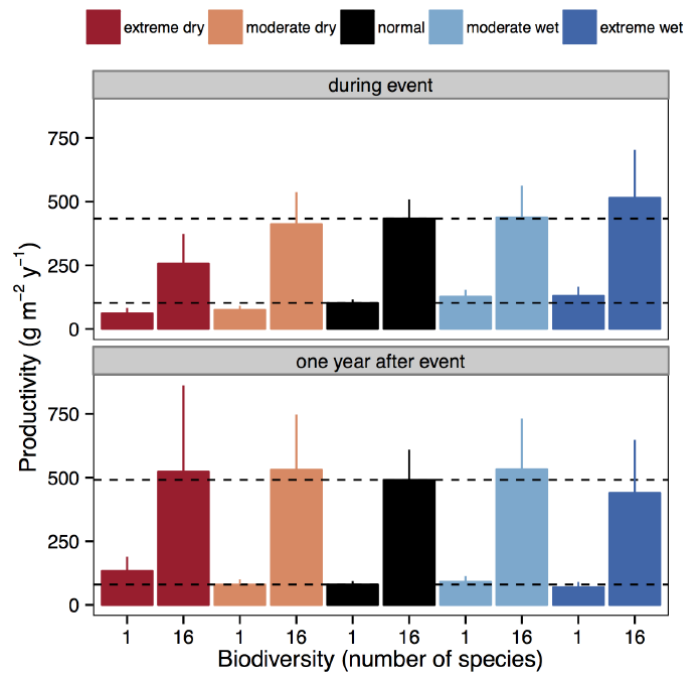


Figure 7. Productivité pendant et après divers évènements climatiques (très sec, moyennement sec, normal, modérément humide et très humide) pour des monocultures et cultures de 16 espèces (12)

Le graphique du haut représente la productivité des plantes (monoculture et cultures de 16 espèces) durant l'évènement climatique (très sec, moyennement sec, normal, modérément humide et très humide), le graphique du bas montre la même productivité un an après l'évènement.

La productivité des plantes tend à diminuer durant les épisodes de sécheresse et augmenter avec l'humidité. Un an après les évènements climatiques le profil tend à s'inverser. De plus, les prairies retrouvent voire dépassent leur productivité.

La productivité après les sécheresses extrêmes pourrait être due à une augmentation des nutriments disponibles et/ou une diminution des herbivores à cause de la baisse de production de plantes durant la sécheresse passée. Ceci pourrait expliquer cette très bonne résilience.

Selon le raisonnement inverse, la baisse de productivité après une période très humide pourrait être due à une diminution des nutriments consommés l'année passée et/ou une augmentation de l'abondance d'herbivores grâce à la saison passée qui a leur offert beaucoup de nourriture.

Par ailleurs, d'autres études rapportent qu'une biodiversité élevée augmente la résistance à l'invasion d'une espèce étrangère. Au développement d'une espèce étrangère, s'opposent plusieurs facteurs contraignants dont le temps, l'espace ainsi que les ressources utilisées par les espèces déjà existantes (biocénose). (13) (14) (15)

De plus, ce phénomène de résistance moindre à l'invasion d'espèces étrangères est fort notable dans les monocultures. De telles cultures sont beaucoup plus fragiles à l'envahissement d'espèces nuisibles comme des mauvaises herbes, parasites, insectes ou maladies. (13) (16) En effet la transmission d'un agent pathogène est corrélée à l'abondance de son hôte comme le démontre la revue de Burdon & Chilvers,

1982. (17)

La complexité d'un système, avec les multiples interactions qu'ont les êtres vivants entre eux entraîne une certaine stabilité, c'est ce que montre une étude de Pollis en 1994. Les perturbations que subit un milieu lui permettent de garder sa richesse car elles évitent l'invasion par des espèces opportunistes d'après Connell 1978. (18)

### 3 - Biodiversité, pilier de la vie de l'Homme

#### a - Besoins primaires

La biodiversité fournit énormément de services à l'Homme. A dire vrai tout ce qu'il lui faut pour vivre : respirer grâce au cycle du carbone, manger suite à la production de matières premières, notamment par les plantes, boire avec le cycle de l'eau et bien sûr se soigner. Aujourd'hui encore, les sources de médicaments qu'offre la nature sont largement utilisées par la médecine, surtout dans les pays en voie de développement. Il existe les médecines dites traditionnelles qui soignent exclusivement grâce à ce qu'on recueille dans la nature.

La médecine occidentale, quant à elle, a certes beaucoup de chimie de synthèse mais la plupart des molécules proviennent du vivant. Citons par exemple l'acide acétylsalicylique extrait de l'écorce de saule et ayant largement fait ses preuves sous le nom d'aspirine. A partir de l'if ont été isolées des molécules utilisées en chimiothérapie pour traiter certains cancers. La pénicilline secrétée par un champignon inhibant la pousse bactérienne est aussi un très beau trésor dérivé de la nature que l'Homme a su utiliser.

Notre bien-être quotidien dépend donc en grande partie de la biodiversité qui nous entoure sans que nous y prêtions forcément attention. En ce qui concerne l'alimentation humaine, celle-ci repose également sur une diversité génétique importante. C'est celle-ci qui permet de garantir une alimentation variée et une production assurée. En effet, la viabilité et l'adaptation des espèces en cas de modification de l'environnement sont préservées si la biodiversité est importante.

Cependant la conservation de la biodiversité par l'Homme fait souvent défaut, même dans le cas de ces cultures et élevages.

D'après l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), les trois quarts de la diversité génétique des plantes cultivées ont disparu au cours du dernier siècle. Seulement 12 espèces végétales et 14 espèces animales nourrissent la quasi-totalité de la population mondiale. Sur 8000 races d'animaux d'élevage recensées dans le monde, plus de 20 % sont menacées d'extinction. (19)

#### b - Protection des risques

De multiples activités humaines tendent à polluer l'environnement. On peut citer l'agriculture, notamment suite à l'usage intensif de produits phytosanitaires de synthèse, très souvent non biodégradables qui polluent les sols et les eaux. Il y a également l'utilisation exponentielle de ressources pétrolières produisant une énergie considérable, mais dégageant des gaz qui encombrant l'atmosphère. Heureusement la biodiversité permet d'en absorber et en recycler une partie.

Pour exemple, les zones humides comme les marais, lacs, rivières... grâce à leur biomasse constituent des filtres qui vont épurer l'eau en améliorant sa qualité. (20)

Certaines plantes absorbent et stockent les métaux lourds tels que plomb, nickel, cuivre, arsenic, aluminium, sélénium. L'arbre à Nickel (*Pycnanandra acuminata*), une plante de Nouvelle-Calédonie concentre dans sa sève plus de 20% de nickel, ce qui donne à sa sève sa jolie couleur bleue. On recense aujourd'hui environ 400 espèces de plantes capables de dépolluer les sols et même l'air de la sorte ! C'est ce qu'on appelle la bioremédiation. (21)

Certaines espèces animales ou végétales sont qualifiées de lanceurs d'alertes. Elles sont très sensibles à la dégradation de la qualité chimique du lieu où elles vivent. Ces bioindicateurs sont de pertinents révélateurs de la santé d'un milieu, à condition bien sûr d'y être attentif. Citons comme exemple le coquelicot qui ne pousse que dans des sols exempts de trop de pollution. Des sentinelles bien connues sont les lichens et mousses, dont certaines espèces se développent plus ou moins suivant la qualité de l'air. La composition de ces communautés peut servir d'indicateur des impacts de la pollution atmosphérique sur l'environnement. (22)

Les crues des rivières, accompagnées généralement de débordements, sont des phénomènes naturels. Dans des écosystèmes variés et préservés, et surtout dans les zones humides, toute cette eau peut être captée car ces lieux jouent un rôle d'éponge.



Ainsi, il est essentiel de garder ces zones intactes pour éviter des inondations. Dans les Basses Vallées Angevines, trois rivières se croisent : la Mayenne, la Sarthe et le Loir. Lorsqu'elles débordent l'eau arrive dans la zone inondable des basses vallées protégeant ainsi Angers la ville la plus proche. Ces zones sont toujours fertiles avec de belles prairies vertes pour satisfaire le bétail.

Les frénétiques activités humaines ont aussi pour conséquence un réchauffement climatique ce qui ne ménage pas du tout la biodiversité surtout ces dernières décennies. Et pourtant il est essentiel de conserver une biodiversité la plus grande possible car elle influence le climat en régulant l'humidité, la température ou encore les émissions de monoxyde de carbone. En ville lorsqu'il fait chaud, c'est près des parcs que l'on respire le mieux, qu'il fait le plus frais. (23)

#### c - Emerveillement

La pluralité de la biodiversité met en éveil tous les sens. A tout âge on s'émerveille devant cette richesse offerte par la nature. Elle nous apporte une quantité de bienfaits de services non valorisables économiquement.

C'est aussi une opportunité d'évasion, de quiétude ou de méditation afin de se ressourcer et de faire une coupure avec nos vies modernes. L'écotourisme l'a bien compris, de plus en plus de sites naturels s'ouvrent pour sensibiliser le public à la préservation de cette majestueuse nature. Les parcs naturels n'ont jamais connu autant de succès.

C'est également une source d'inspiration inépuisable pour bon nombre d'artistes comme Claude Monnet avec les nymphéas ou encore Jean de La Fontaine avec le corbeau et le renard.

#### d - Innovation

La recherche médicale puise constamment dans la biodiversité à la recherche de nouvelles molécules actives thérapeutiques. Il reste encore un très grand champ d'exploration pour trouver de nouveaux médicaments. Cette recherche de molécules actives s'appelle la bioprospection. Entre 1981 et 2005 on estime que 28 % des nouveaux produits pharmaceutiques approuvés aux Etats-Unis pas la FDA (Food and

Drug Administration) étaient des produits naturels ou naturels modifiés. (24)

Le principe du biomimétisme est une approche scientifique qui s'inspire du vivant sous toutes ses formes (animaux, plantes, microorganismes, écosystèmes) pour mettre au point des innovations technologiques. En prenant exemple sur les organisations performantes rencontrées au sein de la biodiversité, on peut concevoir des matériaux et des procédés novateurs plus performants et respectueux de leur environnement.

Le Shinkansen est un train à grande vitesse qui relie les villes d'Osaka et d'Hakata au Japon. L'ingénieur en charge de sa conception s'inspira de la forme du bec du martin pêcheur pour concevoir l'avant du train. Cela permit de réduire ses émissions sonores, mais également sa consommation énergétique tout en augmentant sa vitesse de près de 10 %. (25)

#### e - Valeur économique

Des écologistes ont tenté d'évaluer la valeur économique de la biodiversité en prenant compte des services rendus mais aussi de la valeur culturelle, éthique et sociale de la biodiversité. En 1997, une étude conduite pour le Programme de Nations Unies pour l'environnement (PNUE) par Robert Costanza a chiffré en moyenne à près de 33 000 milliards de dollars la valeur annuelle des services rendus par la nature dans le monde. (6) (24) Cette valeur est très discutée par les scientifiques mais permet de sensibiliser l'opinion publique sur l'importance des services rendus par la nature. Par comparaison le produit national brut ou PNB de l'ensemble des pays serait de l'ordre de 18 000 milliards de dollars. La FAO estime à 200 milliards de dollars par an le service rendu à l'agriculture grâce aux insectes pollinisateurs. Cela représente la somme qu'il faudrait déboursier en leur absence pour maintenir l'agriculture mondiale comme aujourd'hui.

Ces estimations, lorsqu'elles sont fiables, devraient permettre d'écarter l'exploitation de zones dont les bénéfices naturels fournis par la biodiversité sont supérieurs à ceux qui seraient obtenus par une exploitation. Mais pour autant, elles ne devraient pas servir de justification à la destruction d'écosystèmes dits « pauvres » au bénéfice des autres.

La Figure 8 présente un résumé des bénéfices apportés par la biodiversité à l'Homme.

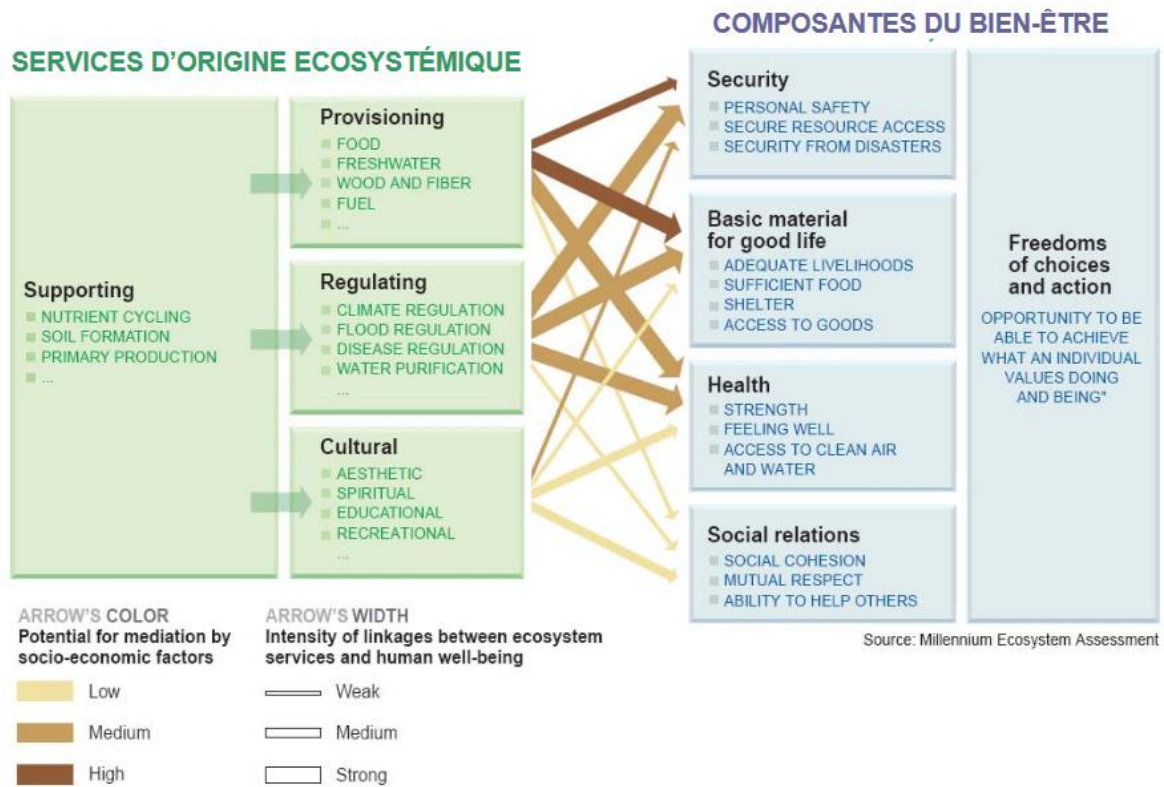


Figure 8. Liens entre services d'origine écosystémique et bien-être de l'Homme  
D'après le rapport de synthèse de l'Évaluation des 2 Écosystèmes pour le Millénaire 2005  
(26)

## CHAPITRE 2

# LES MOUSTIQUES ET LEUR PLACE DANS LA BIODIVERSITE



(27)

## Chapitre II - Les moustiques et leur place dans la biodiversité

Notre vision anthropocentrée nous sort de la nature et on en oublie le rôle important de celle-ci, des espèces qui y sont présentes et de la préservation des équilibres des écosystèmes. L'arrivée de nouvelles pathologies nous rappelle la pertinence de la préservation de cette biodiversité.

Dans tout cela, quelle est la place du moustique ? Comment se positionne-t-il au sein de la biodiversité ? Comment s'adapte-il aux changements de l'environnement ? Est-il seulement un nuisible comme l'Homme a tendance à le penser ?

### 1 - Le moustique

#### a - Classification

Le moustique est un insecte dont la taille varie entre 3 et 10 millimètres. Sa classification est la suivante :

- Classe : Hexapodes (trois paires de pattes),
- Ordre : Diptères (deux ailes),
- Sous-ordre : Nématocères (à antennes longues),
- Famille : Culicidés (moustiques).

Il existe deux sous-familles de moustiques comportant des espèces hématophages, les Anophelinae avec les Anophèles jouant un rôle vecteur en pathologie humaine et les Culicinae dont les plus connus sont *Culex* et *Aedes*, confère Annexe 1. Ces dernières décennies, l'apport de nouvelles techniques d'analyse génétique a permis de progresser dans le classement des genres et sous-espèces, ce qui apporte régulièrement des modifications dans les arbres phylogénétiques.

#### b - Répartition

Sur plus de 3000 espèces de moustiques recensées à travers le monde, environ 300 espèces piquent l'Homme et une centaine sont impliquées dans la transmission des agents infectieux. En réalité une dizaine d'espèces seulement sont responsables de l'essentiel des transmissions, dont les désormais célèbres *Aedes aegypti* et *Aedes albopictus* tous deux incriminés dans l'épidémie de Zika, mais aussi dans celles de la

dengue et de la fièvre jaune. On trouve aussi *Anopheles gambiae*, vecteur du paludisme. Ce sont les femelles exclusivement qui piquent les humains pour récupérer leur sang et assurer le développement de leurs œufs. (28) (29) On les retrouve sur toute la biosphère à l'exception des régions antarctiques, au-delà de 5000 mètres et en dessous de -1000 mètres.

En France les genres hématophages les plus répandues sont *Aedes*, *Anophèles* et *Culex*.

### c - Le cycle biologique, les différentes phases de vie du moustique

La recherche du lieu adéquat pour l'éclosion des œufs est l'oviposition (Fig. 9). Les œufs matures sont déposés par la femelle à la surface d'une eau stagnante ou sur une surface possiblement submersible. Comme cela, dès l'arrivée de la pluie les œufs pourront commencer leur développement. Entourés d'un chorion solide, ils sont très résistants aux variations de température, à la dessiccation ou encore aux traitements insecticides. Leur taille est inférieure au millimètre.

Lorsque les conditions météorologiques favorables sont réunies les œufs éclosent et donnent naissance à des larves mesurant entre 5 et 20 millimètres. Elles se composent d'une tête globuleuse surplombant un thorax massif puis un long abdomen segmenté. Bien qu'aquatiques, les larves ne peuvent respirer sous l'eau, elles doivent remonter à la surface pour cela. Leur développement se décompose en quatre stades successifs entrecoupés de mues qui permettent les changements morphologiques nécessaires au développement de l'insecte. Cette vie larvaire se déroule en moyenne entre 4 et 10 jours.

La dernière mue donne alors une nymphe avec un aspect complètement différent. La tête et le thorax sont fusionnés avec dans le prolongement un abdomen plus fin terminé par une paire de pattes permettant de se déplacer dans l'eau. Il leur faudra encore entre 2 et 10 jours pour donner le moustique adulte que l'on connaît si bien. Pour l'émergence, la nymphe se positionne à la surface de l'eau, et tel un papillon, elle va sortir de sa chrysalide. Il lui faudra enfin 24 à 48 heures pour solidifier sa cuticule et pouvoir voler de ses propres ailes, pour prendre finalement la forme adulte définitive ou imago. Son espérance de vie est alors de 15 à 40 jours. (30)

L'accouplement est unique et se produit dans les 48 premières heures de vie de la femelle. En général, elle ne s'accouple qu'une fois au cours de sa vie et avant le premier repas sanguin. Seule la femelle pique afin de récupérer les nutriments nécessaires à la maturation de ses œufs. Grâce à sa salive, elle anesthésie l'hôte lors de la pique tout en fluidifiant le sang avec l'aide d'anticoagulants pour faciliter le prélèvement. La réaction immunitaire de l'hôte qui suit la pique se traduit souvent par un bouton avec démangeaison.

Après l'accouplement le sperme est alors stocké dans les spermathèques de la femelle et conservé jusqu'à sa mort. L'ovogénèse, sous dépendance hormonale, est déclenchée par l'hématophagie, sauf dans le cas des femelles nectarivores comme les toxorhynchites appelées également « moustiques éléphants ». (31)

A la suite d'un ou plusieurs repas, le sang est digéré, les ovules sont fécondés et ils peuvent alors débuter leur maturation. C'est ce que l'on nomme le cycle gonotrophique. Lorsqu'il a lieu en absence d'hématophagie c'est l'autogénèse. La femelle, en dehors des repas sanguins, se nourrit de nectar de fleurs, le mâle quant à lui s'alimente exclusivement de nectar.

La durée du cycle varie en fonction de l'espèce et de la température, allant de 2 jours à 2 semaines. On décompte en général entre 4 et 8 cycles dans la vie de la femelle avec entre 10 et 300 œufs par ponte, qui restent viables entre 5 et 10 ans. Ce qui donne potentiellement une belle population de moustiques. Par exemple la femelle *A. albopictus* pond en moyenne 200 œufs après s'être nourrie de sang. Elle continue à vivre, pour 48 heures plus tard, recommencer à piquer et pouvoir de nouveau pondre. Ce cycle dure environ un mois, permettant de donner vie à approximativement 3000 moustiques pour une femelle *A. albopictus*. (32)

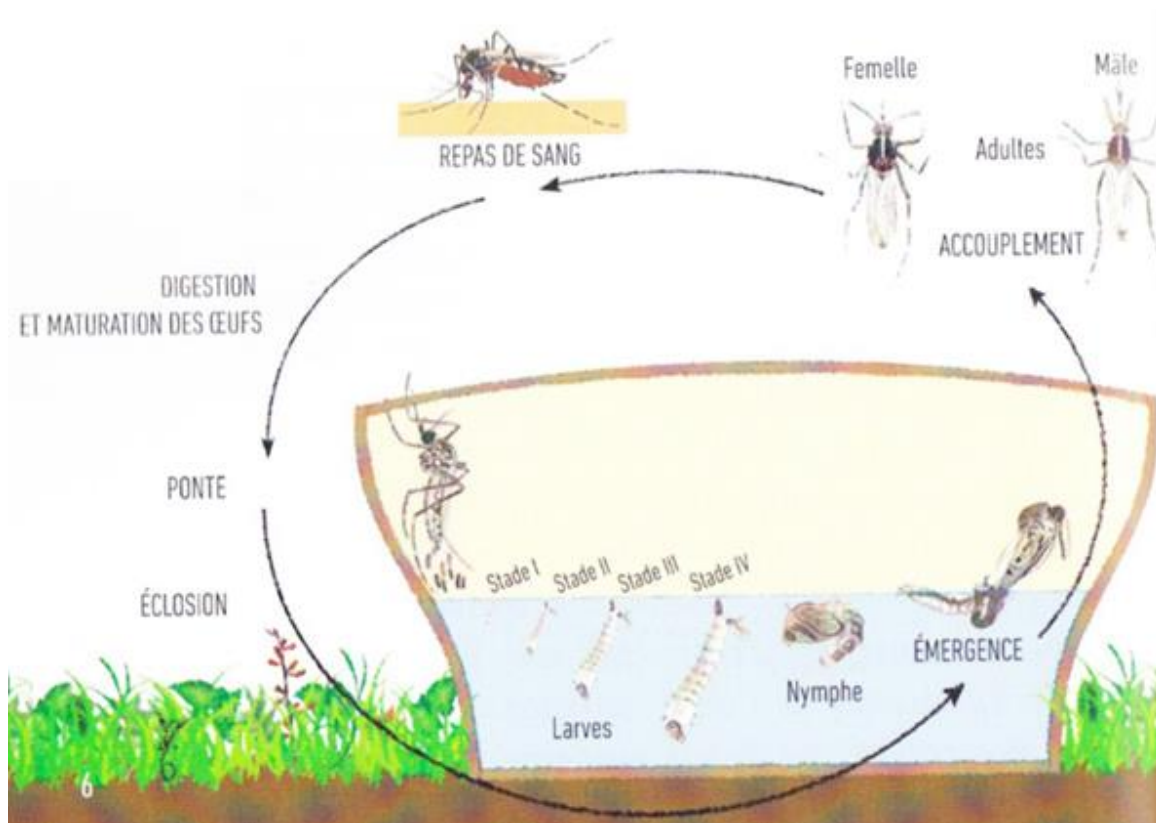


Figure 9. Cycle de vie du moustique d'après Alerte aux moustiques? de Frédéric Simard (29)

Toutes les étapes précédemment indiquées du cycle de vie du moustique sont celles qui se produisent hors diapause. La diapause est un phénomène physiologique complexe qui peut se résumer par un arrêt saisonnier du développement du moustique sous l'influence de stimuli extérieurs. C'est un phénomène d'adaptation de l'insecte lorsque les conditions environnementales ne sont plus optimales pour le maintien de sa survie. On pourrait la comparer à une phase d'hibernation. En milieu tempéré, elle est induite par la présence d'une saison défavorable, telle l'hivers.

En fonction des espèces, l'arrêt momentané du développement peut se faire à différents stades, au niveau de l'œuf, de la larve ou de la nymphe. La diapause peut être aussi la mise en place temporaire d'une vie léthargique de l'adulte. En effet, les insectes sont des animaux à sang froid et la température de leur corps suit rigoureusement la température ambiante. Les adultes se réfugient parfois dans des lieux abrités comme des caves ou hangars. Durant cette diapause, il peut leur arriver de prendre un repas sanguin mais il n'y aura pas production d'œufs tant que la belle saison n'est pas revenue. Pour que l'activité normale reprenne, plusieurs paramètres sont à prendre en compte notamment la durée d'ensoleillement mais aussi la température, la qualité de la nourriture ou encore la densité de la population. (30) (33)



#### d - Les moustiques et leur rôle de vecteur

Lorsque le moustique récupère son repas sanguin il peut ingérer également des agents infectieux présents chez l'hôte (Fig. 10). La plupart du temps ces derniers sont digérés mais dans certains cas les virus ou parasites peuvent passer la paroi de l'estomac. Ils se multiplient alors dans les cellules épithéliales de l'intestin puis infectent les différents organes et tissus du moustique. Enfin ils atteignent les glandes salivaires. Ils peuvent être transmis chez un nouvel hôte lors du prochain repas sanguin. Seuls les moustiques infectés peuvent transmettre des maladies.

Ces diptères sont de redoutables vecteurs de maladies. De plus, si les agents pathogènes mutent, alors ils pourraient être véhiculés non seulement par les moustiques mais aussi par d'autres insectes hématophages. L'avenir pourrait bien nous réserver des surprises...

Il est à noter que suivant les espèces de moustiques les agents pathogènes transmis ne sont pas les mêmes. Par exemple *Anopheles gambiae* peut transmettre le plasmodium agent du paludisme mais pas les virus de la dengue ou du Zika, à l'inverse d'*Aedes aegypti*.

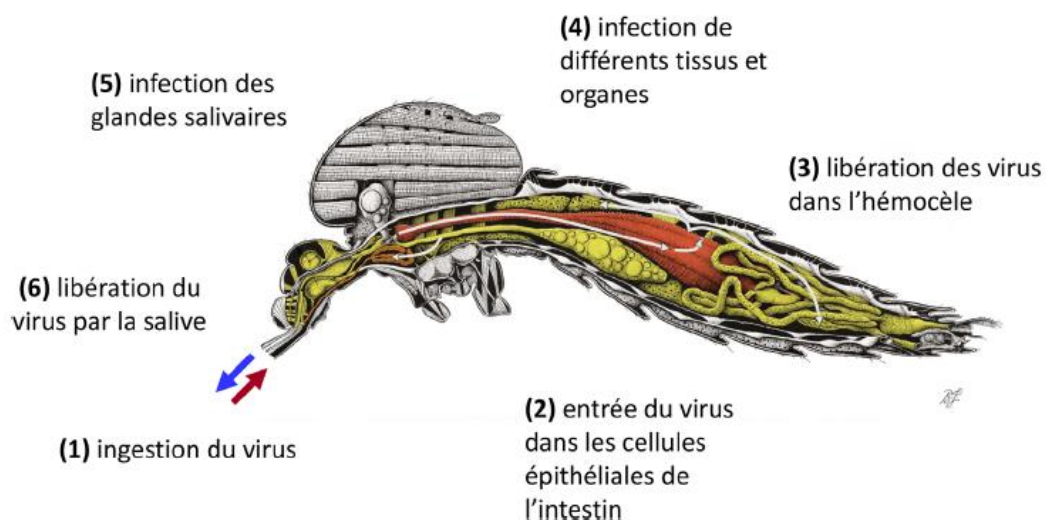


Figure 10. Différentes étapes d'infection du moustique par un arbovirus (34)

## e - « Stratégies » du moustique

Selon les conclusions de l'étude publiée par le journal *Current Biology*, la « stratégie » de chasse des moustiques comporte trois étapes. (35) De 10 à 50 mètres, grâce à ces antennes l'insecte détecte tout d'abord sa proie grâce au CO<sub>2</sub> qu'elle rejette en respirant. Puis, dans un rayon de 5 à 10 mètres, il se sert de sa vue pour identifier les objets denses d'où pourrait provenir la respiration. Ce n'est que lorsque le moustique est suffisamment proche de son hôte qu'il commence alors à percevoir sa signature thermique et l'humidité qu'il dégage, s'assurant ainsi qu'il cible bien un être vivant et non un corps inanimé. A moins de 20 cm, la chaleur dégagée permet au moustique d'identifier les zones les plus chaudes, plus irriguées. L'insecte n'a alors plus qu'à se mettre à table et apprécier son repas sanguin sur un mammifère.

En somme, s'il est possible de neutraliser l'un des sens du moustique, il est, en revanche, difficile de les leurrer tous. Il faudrait que l'humain puisse arrêter de respirer, devenir invisible et ne plus émettre de chaleur.

Certains facteurs multiplient les chances d'être repéré par un moustique. Par exemple, les femmes enceintes sont des cibles privilégiées : leur corps rejette plus de CO<sub>2</sub> que les autres personnes et possède une circulation sanguine plus importante. (35)

Toutefois, il n'y a pas que la chaleur, la forme de la proie ou la respiration que les moustiques peuvent détecter. Plus d'une vingtaine d'odeurs sécrétées par notre peau stimuleraient leur odorat. La présence, ou non, de certaines bactéries sur notre peau pourrait participer à l'élaboration de cette senteur ; on peut ajouter à cela les molécules que nous sécrétons comme l'acide lactique. (36) Il y aurait également une origine génétique à l'attraction soutenue qu'éprouvent les moustiques pour certains individus plutôt que d'autres faisant pourtant partie de la même espèce. (37) (38) De plus, il existe pour les moustiques une préférence d'espèce à piquer plutôt qu'une autre. Les attractions varient en fonction de l'espèce de moustique considérée mais également de la disponibilité des hôtes pour un repas. (39)

## 2 - Place dans la biodiversité

Qui n'a pas rêvé d'un monde sans moustique, surtout au milieu de la nuit quand ces nuisibles nous empêchent de trouver le sommeil ? Ont-ils une place dans la

biodiversité hormis celle de nous ennuyer ?

Comme chaque être vivant sur cette Terre ils font partie d'un ensemble complexe d'interactions, nous allons les décrire dans ce paragraphe.

#### a - Ressource alimentaire

Au sein de la chaîne alimentaire, les moustiques servent de nourriture à de nombreuses espèces. Au stade de larves, ils sont mangés par des invertébrés aquatiques, des batraciens comme les grenouilles, les crapauds, les salamandres et des poissons comme les gambusies, ou encore les lézards et serpents... Puis, en tant qu'adultes, ils constituent les mets de prédilection d'oiseaux, de chauve-souris ou de libellules. En une journée, une hirondelle peut consommer jusqu'à 3 000 moustiques ; la chauve-souris chasse 2 000 moustiques par nuit, même s'ils ne représentent qu'environ 1% de son bol alimentaire. On compte également les araignées, les étourneaux, les martinets, les mésanges, les moineaux, le gobemouche noir (*Ficedula hypoleuca*) ou gri (*Muscicapa striata*), le grimpereau des jardins (*Certhia brachydactyla*), la sittelle torchepot (*Sitta europaea*) ... (40) De par leur grand nombre, les moustiques constituent une biomasse importante à partir de laquelle peuvent se nourrir de nombreux organismes vivants, dont ceux des milieux humides.

#### b - Assainissement de l'eau en zone humide et pollinisation

Les larves ont un régime alimentaire omnivore. Elles participent à la destruction de matières organiques dans l'écosystème aquatique en digérant par exemple les feuilles en décomposition. Ainsi elles contribuent au cycle de l'azote en intervenant dans la première étape de décomposition de l'azote organique en azote minéral, filtrant ainsi les eaux et évitant l'eutrophisation des milieux. L'eutrophisation correspond à un phénomène de dégradation d'un environnement aquatique. Celle-ci est généralement provoquée par une augmentation des substances nutritives présentes. (41) Les larves permettent ainsi le maintien d'un milieu favorable à la vie des plantes environnantes. (28) (42) (33)

Les moustiques se nourrissent principalement du nectar des plantes. Ils butinent

majoritairement les petites fleurs où seuls les petits insectes peuvent pénétrer. Ils sont reconnus comme pollinisateurs du cacaoyer (*Theobroma cacao*) dont la fleur est petite et tortueuse. (43)

Il semblerait cependant que leur rôle reste minime comparé aux abeilles, bourdons ou autres pollinisateurs plus connus. Les moustiques ne semblent pas contribuer majoritairement à polliniser les plantes consommables par l'Homme, c'est pourquoi certains scientifiques les pensent très peu utiles dans ce rôle.

#### c - Régulation de la population humaine ?

Les maladies à transmission vectorielle représentent plus de 17 % des maladies infectieuses dans le monde et provoquent plus d'un million de décès chaque année. (44) Le moustique est l'animal le plus meurtrier pour l'Homme, devant l'Homme lui-même. Il offre une voie idéale de propagation de maladies faisant des ravages dans la population humaine avec la dengue, le virus Zika, le Chikungunya, le paludisme, la fièvre jaune...

Le moustique pourrait être perçu comme un régulateur de la population humaine. En effet, notre espèce dépourvue de prédateur a tendance à s'accroître d'année en année. Est-ce que ce vecteur pourrait limiter notre expansion ?

On pourrait penser également que le moustique est un moteur de l'évolution humaine. En effet, les maladies vectorielles véhiculées par ce diptère éliminent majoritairement les personnes fragiles. Ce modèle est en lien avec la théorie de Darwin, où la sélection naturelle conserve les individus les plus adaptés pour survivre.

Malheureusement cette régulation est loin d'être uniforme puisque ce sont les pays les plus pauvres qui souffrent le plus des maladies transmises par ces insectes. Ils n'ont en effet pas les moyens nécessaires pour prévenir et soigner toute leur population, ce qui entretient un pool de malades potentiellement vecteurs à leur tour lorsqu'un diptère récupèrera leur sang.

#### d - Une espèce dispensable ?

Certains entomologistes comme Janet McAllister, travaillant au Centre de Contrôles et de Préventions à Fort Collins dans le Colorado réfutent l'idée que le moustique soit une espèce irremplaçable. (45) Elle énonce que les fonctions qu'occupe l'insecte dans la biodiversité pourraient être facilement remplaçables par d'autres espèces. D'autres insectes pourraient servir de nourriture dans la chaîne alimentaire, polliniser les plantes ou encore assainir les zones humides en jouant le rôle de décomposeur.

Frédéric Simard, entomologiste médical spécialisé sur l'étude des moustiques vecteurs d'agents pathogènes pour l'Homme à l'unité de recherche Maladies Infectieuses et Vecteurs de Montpellier, rejoint cette idée. D'après lui, « *aucune de ces espèces n'est irremplaçable. Leur disparition pourrait être compensée par l'arrivée d'autres insectes, tels les chironomes, qui profiteraient de l'espace ainsi libéré car la nature a horreur du vide* ». (46)

Il faut cependant rappeler que l'on ne peut pas prédire l'évolution d'un système lorsqu'on supprime une espèce. Comme le souligne Joe Conlon, entomologiste à la Fédération américaine de lutte contre les moustiques en Floride, « *si nous éradiquons tous les moustiques demain, les écosystèmes où ils sont actifs seraient touchés, puis continueraient à vivre. Quelque chose de mieux ou pire prendrait le relais* ». Cela soulagerait peut-être temporairement la souffrance humaine, mais au risque que quelque chose de plus nuisible se substitue ensuite. (45)

Les moustiques, occupent donc plusieurs fonctions dans leur environnement, des rôles bénéfiques et des rôles nuisibles, en tout cas pour l'espèce humaine.

### 3 - Impact du réchauffement climatique sur les moustiques

Le réchauffement climatique engendre beaucoup de modifications, notamment de température, précipitations, humidité et aurait un impact important sur les moustiques et les maladies qu'ils transmettent. En effet, ce changement climatique intervient sur la répartition, l'abondance, le comportement, la dynamique des populations de moustiques vecteurs de maladies. D'une part il agit sur les virus, parasites qui sont transmis par les moustiques, en sélectionnant ceux qui sont le mieux adaptés à ces

nouvelles conditions environnementales. D'autre part, la modification du climat peut interférer dans les relations entre les virus, les parasites et les vecteurs que sont les moustiques.

De nombreux paramètres peuvent ainsi être affectés et moduler le risque de transmission d'un agent pathogène. Chaque composant du système hôte-agent pathogène-vecteur et réservoir va agir différemment face à la modification du milieu et donc influencer in fine les interactions préexistantes. Ceci est représenté dans la Figure 11.

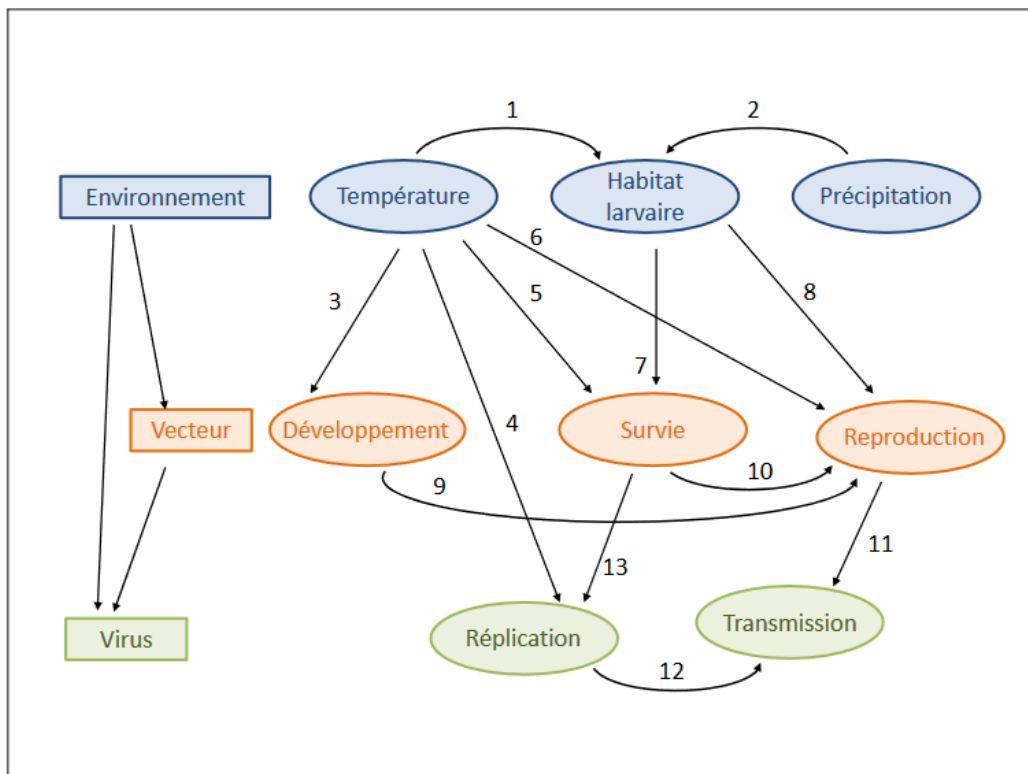


Figure 11. Diagramme des interactions entre des variables climatiques, les vecteurs et les virus (47)

Les chiffres indiquent les relations entre les différentes variables présentées. La disponibilité en habitat larvaire est influencée par la température via l'évapotranspiration (« 1 ») et les précipitations (« 2 »). La température est un déterminant majeur pour la régulation du développement des moustiques (« 3 »), la réplication virale chez les moustiques (« 4 »), la survie (« 5 ») et le comportement de reproduction des moustiques (« 6 »). La disponibilité en gîtes larvaires est nécessaire à la survie des stades pré-imaginaux (« 7 ») et à la reproduction des adultes (« 8 »). Un développement plus rapide et une augmentation de la survie des moustiques accélèrent le taux de reproduction des moustiques (« 9 » et « 10 »). Une augmentation du taux de reproduction des moustiques accroît le risque de transmission en augmentant le nombre de repas de sang (« 11 »), alors qu'une réplication virale plus rapide augmente la transmission en raccourcissant la durée de la période d'incubation (« 12 »). Enfin, une augmentation de la survie des moustiques adultes augmente la réplication du virus (« 13 »), d'après Morin *et al.* 2013. (47)

Dans différentes études, les auteurs se sont penchés sur les effets des conditions climatiques sur les moustiques *A. albopictus*. Il en ressort qu'à la suite d'une augmentation des températures le développement annuel de l'insecte va être modifié. En effet, pour un développement optimal du moustique il faut des précipitations supérieures à 450 mm d'eau par an avec un plateau maximal de développement dès 800 mm de pluie annuelle. Du côté des températures, entre 20 et 25 °C, on a une activité maximale du moustique ; elle devient nulle lorsqu'on descend sous les 15 °C ou monte au-dessus de 30 °C. En hiver, les conditions météorologiques sont également importantes car sous la barre des -1 °C la survie de l'insecte est nulle, elle devient maximale dès 3 °C. (48)

Une étude réalisée à Canton en Chine montre l'impact du réchauffement climatique sur les vecteurs en fonction des saisons. (49) D'après les courbes présentées dans la Figure 12, avec une augmentation de température entre 1 et 5 °C, les moustiques deviendront probablement plus actifs au printemps et en hiver mais beaucoup moins en été. La plus forte variation de population serait observée à +5 °C.

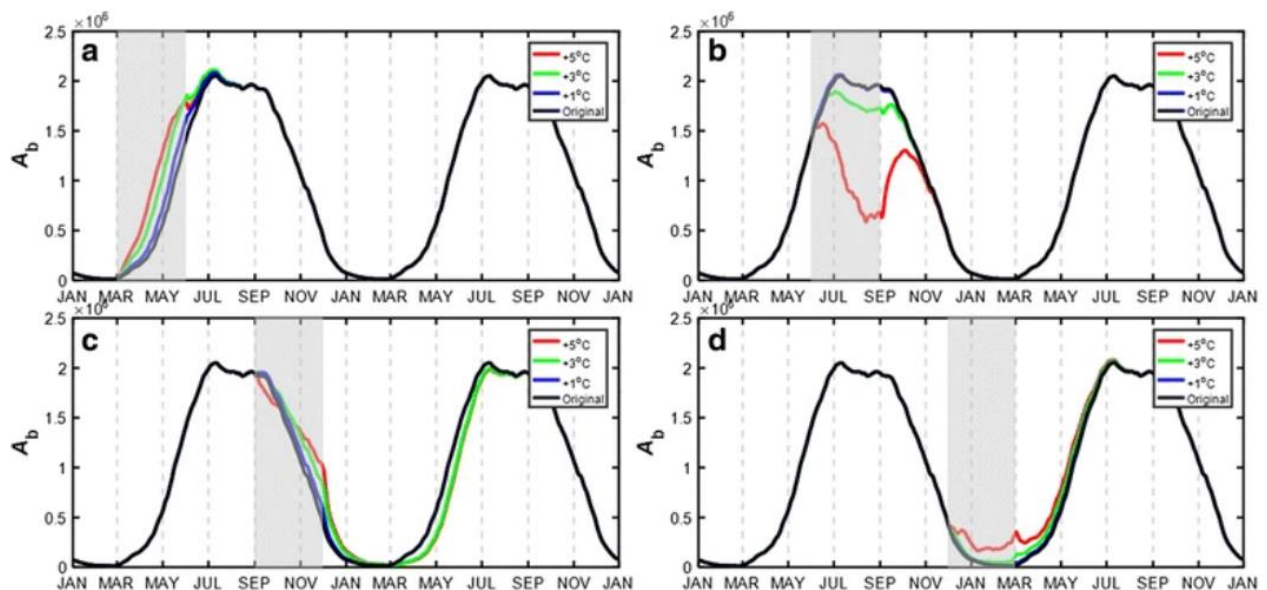


Figure 12. Effet de l'élévation de température avec +1°C, +3°C et +5°C en fonction des saisons a = printemps, b = été, c = automne, d = hiver, sur la population d'*Aedes albopictus* à Canton, Chine. La partie grisée représente l'élévation de température. (49)

La répartition des moustiques suit d'ores et déjà les changements de saisons. Au-delà des températures, il y a aussi d'autres facteurs importants comme la pluviométrie, les réserves d'eau stagnantes ou en encore la lumière journalière. Bien sûr, d'autres éléments non prévisibles restent importants comme la possible adaptation génétique

du moustique à son environnement. Beaucoup de variables impactant l'expansion du moustique ou non vont avoir une incidence et rendent les prédictions de développement délicates à avancer.

Cependant le réchauffement prévu, à un degré modeste, dans les décennies à venir, favorisera très probablement la croissance et l'expansion des espèces dans les régions de haute latitude. (50)

Une des hypothèses concernant la propagation des maladies véhiculées par les moustiques, est la conséquence de la hausse de température au niveau de la période d'incubation extrinsèque des agents pathogènes. Cette dernière est la période nécessaire à l'agent infectieux pour se développer et devenir compétent dans l'hôte. Elle correspond au temps de propagation et de réplication dans les glandes salivaires du diptère pour atteindre une concentration optimale et infecter par la suite d'autres individus. La période d'incubation extrinsèque varie suivant les agents pathogènes, elle est par exemple de 10 à 12 jours pour le virus de la dengue au sein d'*A.aegypti*. (51) L'augmentation modérée de la température semble diminuer cette période. Suivant l'évolution du changement climatique, le moustique sera potentiellement apte à transmettre les maladies plus rapidement, s'il supporte correctement l'élévation des températures bien sûr. (52)

Le changement climatique n'est pas le seul facteur ayant une influence sur le moustique. Les facteurs épidémiologiques, écologiques et socio-économiques sont également à prendre en compte. (53)

Si on veut mettre en place des stratégies efficaces de prévention et de contrôle des moustiques, il est essentiel de comprendre tous les paramètres influant sur le cycle de vie du moustique et tous les organismes avec lesquels il interagit, dont la température sur les différents acteurs de transmission des maladies. Plusieurs modèles sont proposés, mais il est difficile de prévoir avec certitude comment vont évoluer les populations de moustique et les agents pathogènes qu'ils véhiculent avec eux. Pour cela, il faudrait investir dans la recherche afin d'étudier tous les paramètres essentiels, malheureusement les fonds donnés ne sont pas suffisants. Il n'y a pour l'instant pas de consensus sur l'avenir des maladies transmises par les moustiques vecteurs. (54)



#### 4 - Modèles prédictifs d'une population

La dynamique des populations est une branche de l'écologie qui s'intéresse à la fluctuation dans le temps de la taille d'une population (: nombre d'individus, densité, influences du milieu...). Une population animale évolue par les naissances et les décès, qui la font augmenter ou diminuer.

Pour étudier cela on peut utiliser des méthodes observationnelles ou bien des approches expérimentales.

La méthode observationnelle de capture-marquage-recapture est basée sur le suivi individuel d'une partie de la population. Cette méthode est peu employée étant donné la difficulté à manipuler les moustiques sans les abîmer et du faible taux de recapture. Une autre méthode d'observation pour évaluer la taille d'une population est celle des dénombrements. Il s'agit de compter le nombre d'individus présents à un moment donné dans un périmètre. Cette méthode permet de connaître l'état global de la population : stabilité, augmentation, diminution, déclin. Cependant, les dénombrements de populations ne sont pas forcément bien adaptés à tous les écosystèmes, par exemple ceux qui sont difficiles d'accès. Par ailleurs, s'ils permettent une vision globale de la population, ils ne prennent pas, ou mal, en compte la grande hétérogénéité des individus et leurs différentes contributions au taux de croissance de la population.

Les études expérimentales sont qualifiées de méthodes empiriques, c'est-à-dire basées sur des observations dont les résultats sont ensuite analysés par des statistiques descriptives, appelées aussi analyses de données. Ces études apportent de précieuses informations et connaissances sur des points précis du cycle de vie des moustiques. Par exemple, elles permettent d'étudier l'impact de divers facteurs physico-chimiques (température, salinité, tension à la surface de l'eau...) qui interviennent sur le développement des individus et affectent leur longévité ou encore leur fécondité. (55)

Des modèles mathématiques ont été mis en place pour prédire l'évolution des populations de moustiques à un endroit spécifique et à un moment donné. En partant de relevés de données concrètes sur le terrain, ils ont pour objectif d'estimer l'évolution de la population d'individus cibles.

Plusieurs modèles se sont succédés avec pour précurseur Malthus qui a modélisé la dynamique d'une population sur la base de l'équation différentielle. Seulement il n'a pas pris en compte les aléas dus au milieu ambiant (nourriture, prédateurs, climat, variations dans l'unité de temps...). Dans son modèle, la population n'a pas de seuil limite de croissance puisqu'il n'y a pas de facteurs limitants. Ce modèle fut ensuite modifié pour faire apparaître un seuil critique de population, il devint le modèle de Malthus-Verhulst qui permet de gérer les espèces invasives. Toutefois, l'inconvénient de ce dernier modèle est de ne pas prendre en compte le fait que lorsque le nombre d'individus d'une espèce est trop petit, il arrive que les partenaires sexuels ne se trouvent pas et qu'alors la population disparaisse.

Aujourd'hui on a une sophistication de nouveaux modèles qui prennent encore plus de paramètres en compte. Etant donné leur complexité, ces modèles nécessitent un logiciel de calcul scientifique pour les développer. Ils doivent reproduire les faits observés pour être approuvés. Ils sont validés en accord avec plusieurs scientifiques dont les entomologistes. C'est le cas par exemple du modèle MOMA (« Model Of Mosquito *Aedes aegypti* ») qui dispose d'une base de connaissances robustes sur les caractéristiques biologiques et comportementales des moustiques étudiés grâce aux expériences et connaissances acquises sur le terrain. Il utilise plus de 50 paramètres et variables, ce qui rend sa réalisation et calibration complexe. Afin de valider le modèle des entomologistes ont vérifié sa cohérence. Cela permet d'explorer des scénarii qu'il serait impossible d'observer in situ. (56) Plusieurs modèles sont disponibles en fonction de la population cible, du lieu et des divers paramètres qui ont un impact sur la population étudiée. On trouve également des modèles qui évaluent la transmission d'une maladie par le moustique. Selon certains, l'éradication du chikungunya par exemple pourrait être obtenue si la population de moustiques vecteurs diminuait en deçà d'un certain seuil. (57)

Cela est intéressant à noter pour réfléchir à des actions efficaces en santé publique.

Ces modèles sont bien sûr à manipuler avec précaution car il faut connaître leurs limites et s'assurer que tous les paramètres soient respectés afin d'obtenir un résultat fiable.

Nous allons désormais nous intéresser à une espèce de moustique qui fait beaucoup parler d'elle depuis quelques années, *A. albopictus* appelé également moustique tigre.

## 5 - Le moustique tigre *Aedes albopictus* en France

Parmi toutes les espèces de moustiques répandues en France s'il en est une qui se fait particulièrement remarquer ces dernières années, c'est bien sûr *A. albopictus* plus connu sous le nom de moustique tigre. Sa couleur zébrée noire et blanche est responsable de son nom. (Fig. 13) Plus précisément, il présente de fines bandes blanches sur l'abdomen, une bande centrale sur le thorax et des anneaux blancs situés sur les pattes après les articulations. Il est par ailleurs légèrement pailleté d'argent et laisse de la poudre (comme les ailes des papillons) quand il est écrasé. Ce moustique est de petite taille, entre 5 et 10 millimètres, soit inférieure à une pièce de 1 centime d'euro. Il a une activité diurne, avec une nette préférence pour le matin et le soir. Il ne s'aventure pas trop en hauteur, préférant rester au rez-de-chaussée ou au premier étage des habitations.



Figure 13. Photographie d'*Aedes albopictus* (58)

Cette espèce invasive venue d'Asie s'adapte particulièrement bien dans les différents milieux de l'hexagone. Ces œufs, très robustes, peuvent supporter des hivers froids et de longues périodes de sécheresse, ce qui permet à l'espèce de ressurgir dès que les conditions climatiques lui sont favorables. Il s'est installé en 2004 dans le département des Alpes maritimes et depuis il continue à se répandre dans la métropole. Il couvre plus de la moitié du territoire aujourd'hui. Dans la Figure 14 est présentée la carte d'implantation du moustique tigre dans 58 départements français eu 1<sup>er</sup> Janvier 2020.

Carte des départements où l'installation d'Aedes albopictus est connue au 1er janvier 2020

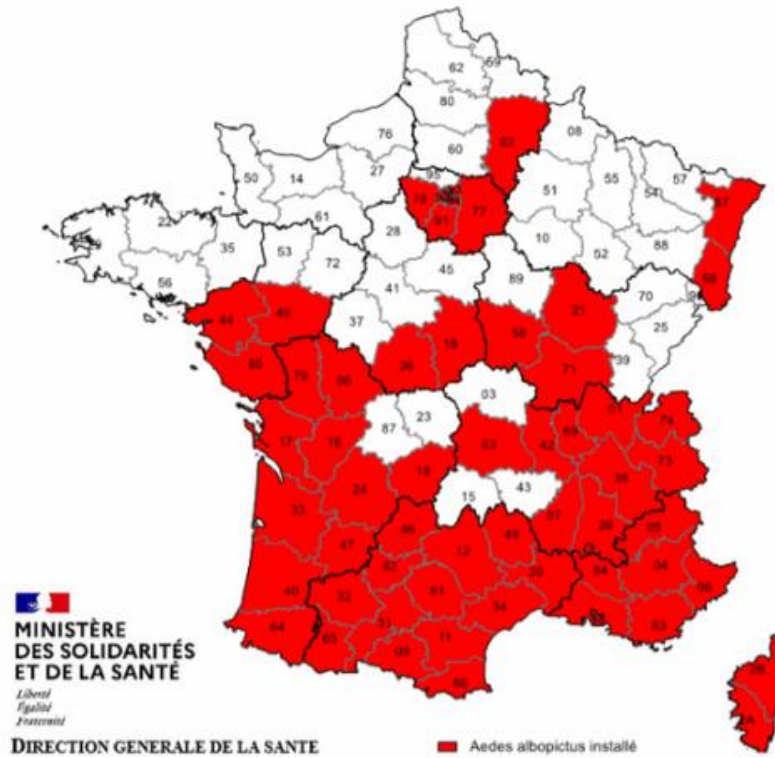


Figure 14. Présence du moustique tigre en métropole au 1er Janvier 2020 (59)

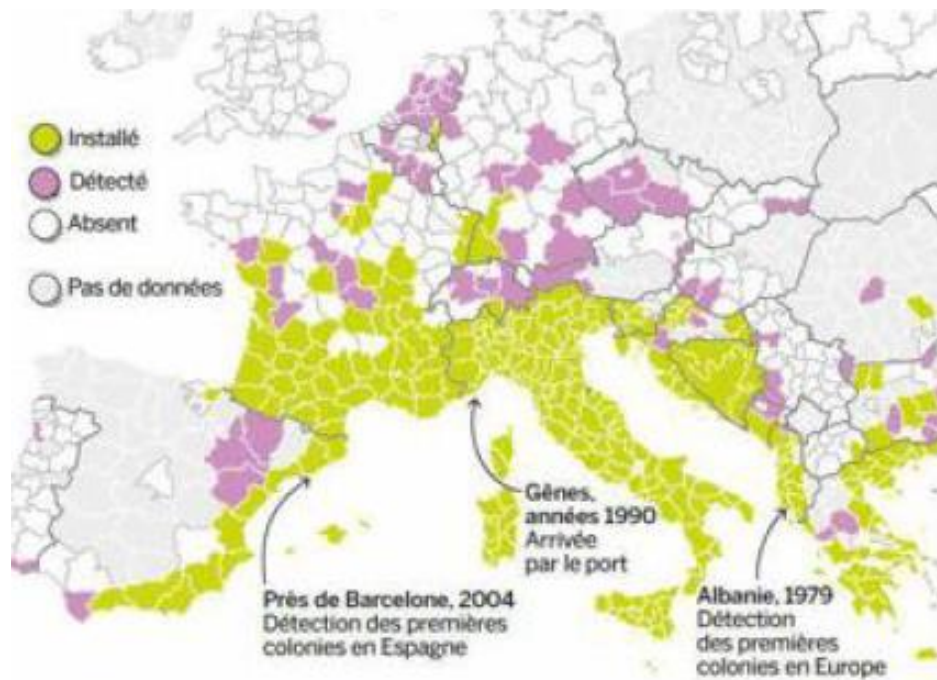


Figure 15. Aire de distribution du moustique tigre en Europe en Janvier 2019 d'après Le Monde (60)

La première indication d'*A. albopictus* en Europe a été rapportée en Albanie en 1979. En France on relève les premiers spécimens en 1999, son implantation a été mise en évidence en 2004. Des populations ont été découvertes en Espagne et Belgique en 2004 également. Son aire de distribution en Europe en 2019 est indiquée dans la Figure 15.

Cette expansion du moustique est arrivée avec le développement des moyens de transport, du commerce international et notamment celui des pneus usagés. Les déplacements humains, notamment via les axes routiers, de plus en plus intenses aident aussi le moustique tigre à se répandre en régions et sur tout le globe. Le changement climatique semble également être un facteur déterminant dans l'émergence du parasite un peu partout dans le monde.

Les femelles d'*Aedes albopictus* deviennent très agressives à l'aube et au crépuscule. Il semblerait que certaines espèces aient une sensibilité olfactive qui varie en fonction du moment de la journée, c'est lorsque la sensibilité est maximale pour une espèce qu'elle est la plus agressive. (61) Les moustiques tigres ont une attirance préférentielle pour les humains mais peuvent également piquer d'autres espèces comme les chats, chiens, chevaux, rats... Les œufs sont pondus majoritairement à l'ombre, sur un support sec et foncé et à proximité d'une présence d'eau. Les femelles colonisent avant tout les gîtes artificiels fournis par l'Homme comme les seaux, vases, soucoupes, fûts et citernes, écoulements de gouttières, pneus, boîtes de conserve et tous petits réceptacles d'eaux pluviales ou domestiques à découvert. Elles sont aussi en mesure de coloniser les végétaux. (27) La période de ponte en France métropolitaine se situe en général sur plusieurs mois, de mai à novembre. Durant l'hiver, l'œuf survit en état de dormance dans les régions tempérées grâce à la diapause.

Semblable à celle du moustique commun, la piqûre est généralement peu douloureuse. Elle entraîne fréquemment l'apparition d'un bouton plus ou moins important selon l'individu. La démangeaison est quasi immédiate puis s'atténue, elle peut réapparaître après un frottement ou une douche par exemple.

## 6 - Risques vectoriels du moustique tigre

Ces récents envahisseurs sont gênants avec leur appétit féroce pour notre sang. Ils importunent régulièrement nos soirées ou nos nuits en nous laissant des piqûres avec démangeaisons. Ces nombreuses piqûres sont incommodantes et nous gâchent certes nos vacances estivales, mais elles sont également une possible voie de transmission de maladies.

Les arbovirus, soit les virus transmis par des arthropodes, les plus connus sont :

- le chikungunya : cette maladie est causée par un Alphavirus présent en Afrique, Asie du Sud-Est, Inde et Océan indien. La maladie se manifeste après une incubation de 2 à 10 jours. Une fièvre élevée apparaît brutalement, accompagnée de maux de tête, de courbatures ou de douleurs articulaires. Ces dernières peuvent être intenses, touchant principalement les extrémités des membres (poignets, chevilles, phalanges). En langue Makondée en Tanzanie, chikungunya signifie « qui marche courbé en avant », et évoque la posture adoptée par les malades en raison d'intenses douleurs articulaires. D'autres symptômes peuvent également être associés, telle une conjonctivite, une éruption cutanée, des nausées ou encore des saignements de gencives ou de nez. (62)
- la dengue : un Flavivirus en est responsable. Il sévit principalement dans l'ensemble de la zone intertropicale. La dengue est également appelée « grippe tropicale ». Les symptômes s'apparentent à un état grippal avec une forte fièvre, des maux de tête, des courbatures ou encore une éruption cutanée ressemblant à celle de la rougeole. Elle se manifeste dans les 2 à 7 jours après la piqûre. On trouve également des hémorragies conjonctivales, des saignements de nez ou des ecchymoses. Le plus souvent la fièvre est bénigne bien qu'invalidante. Dans 1% des cas elle peut toutefois se compliquer en dengue hémorragique, forme extrêmement sévère avec une fièvre persistante et de multiples hémorragies, mortelle dans 30 à 40% des cas en l'absence de prise en charge. (32) Elle est classée dans les maladies ré-émergentes par l'OMS, le nombre de cas annuels est estimé à 50 millions. (63)

- le zika : l'agent responsable appartient aux Flavivirus comme la dengue. Il sévit surtout en Amérique centrale et Amérique du Sud. La période d'incubation va de 3 à 12 jours. Cette maladie est dans la majorité des cas asymptomatique, car 70 à 80% des personnes ne développent pas de symptôme. Pour le reste, on retrouve un état grippal avec fatigue, fièvre, maux de tête, douleurs musculaires et articulaires. Il peut y avoir des éruptions cutanées, conjonctivites, œdèmes des mains ou des pieds. Des complications neurologiques post-infectieuses sont peu fréquentes mais existent. Chez les femmes enceintes, cela peut engendrer la microcéphalie c'est-à-dire de graves anomalies dans le développement cérébral du fœtus. (64) (65)

En 2018, on a notifié 352 cas de maladies importées via le moustique tigre et 8 cas autochtones. Il a été relevé 16 cas de chikungunya tous importés, 333 cas de dengue dont 8 autochtones, 10 cas d'infection au virus zika tous importés et 1 cas de flavivirus issu d'un potentiel croisement de 2 virus. Ces maladies sont à déclaration obligatoire. Les cas sont reportés dans l'annexe 2. (66)

La majorité des cas sont importés mais le risque de cas autochtones reste bien présent. Actuellement en France 30 départements rassemblent les conditions propices à l'émergence du chikungunya, soit : présence du moustique vecteur, conditions météorologiques favorables à l'éclosion des œufs et voyageurs revenant de pays endémiques donc potentiellement contaminés. (62)

Une surveillance est active dans les départements hébergeant ce moustique afin de pouvoir suivre l'évolution de ces maladies. Les particuliers peuvent participer aux signalements du moustique tigre sur le site internet <http://www.signalement-moustique.fr> et l'application pour smartphone, I-moustique.

# CHAPITRE III

## PREVENTION DES MALADIES TRANSMISES PAR LES MOUSTIQUES



(67)



## Chapitre III - Prévention des maladies transmises par les moustiques

Dès l'antiquité, les Hommes ont essayé de repousser les moustiques avec des substances naturelles, végétales et minérales comme l'arsenic ou la fleur de chrysanthème. Jean de la Quintinie constatât les qualités insecticides de la quinine dans les années 1680. C'est au milieu du XX<sup>ème</sup> siècle, grâce aux progrès de la chimie organique, qu'on a vu apparaître la synthèse des premiers insecticides. Ils sont plus efficaces et rémanents que les produits naturels mais également plus toxiques pour l'environnement et a fortiori l'Homme. (68)

La lutte antivectorielle ou LAV est l'affaire de tous, de chaque individu comme des instances publiques. Elle regroupe la lutte et la protection contre les arthropodes hématophages ainsi que leur surveillance. Elle comprend la lutte chimique et/ou biologique, l'action sur l'environnement, l'éducation sanitaire, les actions sociales et l'évaluation continue de toutes ces méthodes. Chacun à son échelle peut aider à diminuer l'expansion de ces nuisibles.

### 1 - Protections individuelles, conseils du pharmacien

#### a - Protection physique

La protection la plus efficace est l'éviction du contact humain-moustique, comme cela le diptère ne peut pas venir nous embêter et nous faisons barrière à la contamination.

La moustiquaire est une bonne protection car elle empêche le contact étroit avec le diptère. Pour qu'elle soit efficace, il faut s'assurer de son bon état, elle doit être intacte et dépourvue de trou pouvant laisser passer l'agresseur. Il est essentiel également de bien la positionner en évitant de toucher la peau, sinon les moustiques peuvent prendre leur repas. C'est un très bon système notamment pour la nuit. En journée, si on reste à l'intérieur d'un habitat, il existe aussi des moustiquaires à poser au niveau des ouvertures comme les portes et fenêtres.

En revanche à l'extérieur cela ne convient pas, il est recommandé de porter des vêtements clairs amples et longs qui couvrent les chevilles, avec des chaussures

fermées pour diminuer les surfaces atteignables par les moustiques. Pour une meilleure efficacité, on peut imprégner les vêtements ou moustiquaires avec un pyréthrianoïde. La perméthrine est un pyréthrianoïde à effet rémanent stable : l'imprégnation de vêtements conserve un effet répulsif pendant 2 mois après 4 à 6 lavages. Pour les moustiquaires, l'imprégnation est durable pendant 3 ans.

Afin de limiter le contact avec les moustiques, il est préférable de rester à l'intérieur des habitations sur la période de la journée où les moustiques sont les plus actifs. La climatisation ou les ventilateurs dans les zones d'habitation peuvent gêner le vol des moustiques et les tenir éloignés.

#### b - Répulsifs cutanés : protection chimique

Dans le cadre de la protection personnelle antivectorielle, un répulsif est une substance qui présente une propriété répulsive vis-à-vis des arthropodes hématophages. Repoussant le vecteur potentiel, elle limite le contact homme-vecteur. (69)

Les 10 caractéristiques idéales d'un répulsif sont :

- une efficacité prolongée sur un large spectre d'arthropodes ;
- l'absence d'effet irritant sur la peau ;
- l'absence d'odeur ou une odeur agréable ;
- l'absence d'altération des fibres textiles lors de l'application vestimentaire ;
- l'absence de résidu gras sur la peau ainsi qu'une résistance au lavage et à l'abrasion ;
- l'absence d'effet sur les plastiques usuels ;
- une stabilité chimique ;
- un coût raisonnable pour un usage large ;
- l'absence de toxicité ;
- une rémanence suffisante. (70)

Les répulsifs cutanés appliqués sur les parties découvertes du corps permettent d'éloigner les insectes sans pour autant les tuer. Pour une utilisation optimale, ils doivent être appliqués lorsque les insectes sont les plus actifs dans la journée. La durée de protection varie en fonction des molécules, de leur concentration et de leur

utilisation. Baignades, transpiration, vent la diminuent. La durée de protection est en moyenne de 4 à 8 heures. Il faut toujours se référer au fabricant pour le mode d'emploi, l'âge conseillé, et le nombre d'applications. Plusieurs formes sont disponibles sur le marché : aérosol, crème, lotion ou bâton applicateur, chacun pourra y trouver son bonheur.

En cas d'utilisation concomitante de crème solaire, il faut bien veiller à mettre cette dernière au moins 20 minutes avant le répulsif pour éviter d'augmenter la pénétration cutanée du répulsif. (71)

La Haute Autorité de Santé ou HAS recommande fortement d'utiliser les substances actives faisant l'objet d'une évaluation de leur innocuité (toxicité animale et humaine, génotoxicité, écotoxicité) et efficacité dans le cadre de la réglementation européenne biocide (directive 98/8/CE). Il faut également respecter les précautions d'utilisation fournies par le fabricant. En annexe 3, on retrouve les recommandations du HCSP de 2015, concernant les répulsifs commercialisés en France, à utiliser contre les moustiques.

Les substances actives commercialisées répondant à ces critères sont : le DEET, la picaridine (icaridine ou KBR3023), l'IR3535 et le PMD. (69)

Pour se protéger des Anophèles, Aedes et Culex dans les régions à risque de maladies à transmission vectorielle, il est conseillé d'utiliser les produits avec des concentrations efficaces pendant au moins 4 heures, qui sont :

- DEET (*N,N*-diethyl-*m*-toluamide) : 35-50%
- IR3535® : 20-35%
- picaridine : 20-30%
- PMD (*p*-menthane-3,8-diol) : 20-30%

#### DEET : *N,N*-diéthyl-*m*-toluamide

Le DEET a été mis au point en 1946 pour l'armée aux Etats-Unis. C'est la molécule la plus ancienne et encore également la plus utilisée étant donné son efficacité. Elle réduit la capacité des moustiques à localiser les humains. Le DEET est un répulsif efficace contre les moustiques, les tiques et autres arthropodes lorsqu'il est utilisé sur la peau ou les vêtements.

Appliqué sur la peau il apporte une protection variant de 3 à 7 heures selon la concentration du produit. On utilise des produits avec une concentration de 50% au

maximum.

Il n'altère pas le coton, la laine et le nylon mais peut faire fondre le plastique. Il possède une odeur désagréable et une consistance huileuse qui ne rend pas forcément agréable son utilisation. Avec une application correcte le bilan sécurité du DEET est très bon. On note tout de même quelques effets indésirables comme des irritations oculaires et cutanées. Il expose aussi à des réactions allergiques voir des effets indésirables neurologiques et cardiovasculaires lors d'applications cutanées prolongées et étendues. (69) (72) (73)

Les produits commercialisés en France contenant du DEET sont répertoriés dans l'annexe 3. Ceci est valable pour les molécules répulsives présentées ci-dessous.

#### IR 3535<sup>®</sup> ou *N*-acétyl-*N*-butyl- $\beta$ -alaninate

Synthétisé en Allemagne en 1969, l'IR3535<sup>®</sup> est un composé synthétique approuvé par la FDA en 1999. Ce répulsif a été conçu pour cibler les moustiques, les tiques, les poux et les mouches piqueuses.

On suppose que son efficacité est due à des activités inhibitrices et excitatrices sur les neurones olfactifs des insectes. A une concentration de 25%, son temps d'efficacité est estimé à 4 heures. Il peut entraîner une irritation oculaire et une altération d'habits ou de plastiques mais génère tout de même moins d'effets indésirables que le DEET. L'IR3535<sup>®</sup> est incolore, presque inodore et biodégradable. (69)

#### La picaridine, icaridine, KBR 3023 ou carboxylate de sec-butyl-2-(2-hydroxyéthyl)-1-pipéridine

Introduite sur le marché dans les années 1990, la picaridine présente de nombreuses caractéristiques du répulsif idéal. Elle est inodore et sans consistance huileuse comme le DEET. De plus elle est moins susceptible d'irriter la peau. Peu d'effets indésirables graves ont été relevés et elle n'endommage pas les plastiques ni les tissus.

A une concentration de 20 à 25% la molécule a une efficacité répulsive similaire au DEET, à 50% elle présente une efficacité qui dure jusqu'à 10 heures contre les mouches, moustiques et tiques. (74)

Le mécanisme d'action de la picaridine est inconnu, mais on pense qu'elle constitue une barrière de vapeur qui dissuade l'insecte de piquer. (69)

#### PMD ou *p*-menthane-3,8-diol

Le PMD est un dérivé d'eucalyptus citronné (*Corymbia citriodora*) obtenu après distillation des feuilles. C'est un composé solide blanc avec une légère odeur de menthe. La première utilisation documentée a eu lieu dans les années 1960 en médecine traditionnelle chinoise. (75)

Le PMDRBO (PMD Rich Botanical Oil) que l'on retrouve sur le marché est un mélange de *cis*- et *trans-p*-menthane-3,8-diol connu sous le nom de marque Citriodiol®.

La toxicité de cette molécule est faible pour l'humain, dans le respect des indications données par le fabricant bien sûr. On note toutefois une irritation oculaire. Elle ne semble pas toxique pour l'environnement. (69)

Attention, l'utilisation de produits répulsifs chez les enfants et les femmes enceintes exige des précautions. Les femmes qui allaitent doivent être attentives à ne pas appliquer de produit au niveau du sein et à se laver les mains avant chaque tétée.

Un résumé est présenté dans le tableau 1. La substance active, les concentrations des molécules répulsives entrant dans la composition des répulsifs admis sur le marché français, l'âge à partir duquel il est possible d'utiliser ce produit ainsi que le nombre d'application maximale par jour y sont indiqués.

Tableau 1 : Concentration des molécules répulsives entrant dans la composition des produits mis sur le marché (71)

Concentrations des substances actives entrant dans la composition des produits répulsifs			
Âge	Substance active	Concentration	Nombre maximum d'applications par jour
De 6 mois à l'âge de la marche	PMDRBO <sup>*3</sup>	19 à 25 %	1
	IR3535 <sup>*3</sup>	20 %	1
De l'âge de la marche à 24 mois	DEET <sup>*1,2</sup>	10 à 20 %	Posologie selon indications dans l'AMM
	PMDRBO <sup>*3</sup>	19 à 25 %	2
	IR3535 <sup>*3</sup>	20 %	2
De 24 mois à 12 ans	DEET <sup>*1,2</sup>	10 à 20 %	Posologie selon indications dans l'AMM
		30 à 50 %	Posologie selon indications dans l'AMM
	KBR3023 <sup>*3</sup>	20 à 25 %	2
	PMDRBO <sup>*3</sup>	19 à 25 %	2
	IR3535 <sup>*3</sup>	20 à 35 %	2
Plus de 12 ans	DEET <sup>*1,2</sup>	20 %	Posologie selon indications dans l'AMM
		30 à 50 %	Posologie selon indications dans l'AMM
	KBR3023 <sup>*3</sup>	20 à 25 %	3
	PMDRBO <sup>*3</sup>	19 à 25 %	3
	IR3535 <sup>*3</sup>	20 à 35 %	3
Femmes enceintes	DEET <sup>*1,2</sup>	20 %	Uniquement si risque de maladie avéré. Posologie selon indications dans l'AMM
		30 à 50 % si risque de maladie vectorielle	Uniquement si risque de maladie avéré. Posologie selon indications dans l'AMM
	KBR3023 <sup>*3</sup>	20 %	3
	IR3535 <sup>*3</sup>	20 %	3

Source : Haut Conseil de la Santé Publique, dans le Bulletin épidémiologique hebdomadaire, 21 mai 2019.

### c - Répulsifs en aromathérapie

Les huiles essentielles sont des liquides concentrés et hydrophobes de composés aromatiques volatils d'une plante. Elles offrent l'avantage d'être plus biodégradables que les produits de synthèse.

L'huile essentielle de citronnelle (*Cymbopogon nardus*), découverte en 1901, était le répulsif le plus largement utilisé avant les années 1940. Elle est encore utilisée aujourd'hui dans de nombreuses formulations malgré son efficacité inférieure à celle des produits plus récents. (72) Les autres huiles essentielles présentes sur le marché les plus communément utilisées sont celles d'eucalyptus citronné (*C. citriodora*), de

géranium rosat (*Pelargonium graveolens*), et de margousier ou neem (*Azadirachta indica*). (69) (74) L'annexe 5 regroupe les principales plantes utilisées pour leur huiles essentielles avec les molécules actives et leurs spectres d'action.

L'inconvénient des huiles essentielles est qu'elles sont très volatiles et donc ont souvent une durée d'action limitée. Selon une étude sur les moustiques réalisée en 2002, l'activité répulsive des molécules d'origine naturelle comparée au DEET ne dépasserait pas 3 à 20 minutes, excepté le PMD (*p*-menthane-3,8-diol) extrait d'eucalyptus citronné (*C. citriodora*) qui, à une concentration de 50%, peut atteindre 7 heures de protection. (76)

Étant donné leur efficacité en général inférieure à une vingtaine de minutes vis-à-vis des principaux vecteurs et des risques allergiques et de photosensibilisation la HAS déconseille l'utilisation des huiles essentielles comme répulsif cutané.

Certains utilisateurs sont gênés par l'odeur que dégagent ces composés et la sensation huileuse lors de l'application cutanée. De nouvelles formulations pourraient augmenter la durée d'action ainsi que l'acceptabilité des utilisateurs.

Les recherches sur les répulsifs à base de plantes sont un domaine en constante augmentation depuis que les consommateurs demandent des moyens de protection « naturels » contre les vecteurs de maladies des arthropodes. Il s'agit de trouver un produit sûr, agréable et respectueux de l'environnement.

#### d - Insecticides

À la différence des répulsifs, les insecticides provoquent la mort de l'insecte. Certains peuvent avoir un effet répulsif en plus de l'effet insecticide. Cependant, leur utilisation doit être limitée au strict nécessaire pour ne pas détruire d'autres espèces d'insectes essentiels.

#### La perméthrine

Commercialisée en 1973, la perméthrine est un pyréthrianoïde. C'est un dérivé de pyréthrine naturelle extraite de fleurs de chrysanthèmes. La perméthrine agit comme un répulsif et un insecticide très efficace contre les tiques, les moustiques et autres arthropodes.

Une forte excitation du système nerveux de l'insecte et le blocage du mouvement du sodium dans les cellules entraînent la paralysie.

La perméthrine est souvent utilisée sur les vêtements, les chaussures, les moustiquaires et le matériel de camping. Pour être efficace, elle doit être réappliquée tous les cinq lavages. C'est l'insecticide majeur sur le marché.

Les pyréthrinoïdes sont peu volatils. En faible quantité, ils semblent peu toxiques. Ils sont peu absorbés par la peau et sont rapidement métabolisés en dérivés non toxiques. Quelques effets secondaires peuvent apparaître : des démangeaisons, des irritations nasales ou oculaires et de la peau. Des effets sur la reproduction, la mutagénicité et des altérations du système immunitaire sont possibles. (73)

### Autres insecticides

D'autres insecticides sont disponibles sur le marché, ils font également partie de la famille des pyréthrinoïdes et ont une action neurotoxique. On peut citer la deltaméthrine utilisée pour imprégner les vêtements ou moustiquaires. (77) (78)

#### e - Autres techniques pour repousser les moustiques

La HAS considère que l'on peut utiliser d'autres méthodes pour repousser les moustiques mais en complément de celles vues précédemment. Elle a recensé : les aérosols pour utilisation ponctuelle, les insecticides à diffusion continue sous formes de plaquettes chauffantes (prises électriques) ou sous forme de liquide (diffuseurs électriques) pour l'intérieur. Les serpentins fumigènes doivent être réservés à un usage extérieur et de courte durée.

Certains des produits cités précédemment sont potentiellement efficaces mais manquent cependant d'information sur les doses délivrées de données techniques, ce qui empêche une évaluation avec rigueur par les comités scientifiques. Il s'agit des produits aérosols ou spray pour l'environnement, diffuseurs électriques à recharges liquides, serpentins fumigènes, bougies, bracelets, pièges lumineux ou avec produits attractants.

D'autres produits sont utilisés mais cependant il n'existe pas d'étude probante montrant leur efficacité comme les appareils à ultrasons, la vitamine B1, l'homéopathie, les raquettes électriques, les rubans ou papiers autocollants gluants sans insecticide. (69)



Il serait judicieux de mettre en place des études scientifiques afin de confirmer leur efficacité.

<p><b>Moyens les plus efficaces :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Moustiquaire imprégnée de berceau, de poussette...pour un enfant avant l'âge de la marche</li> <li>• Moustiquaire imprégnée d'insecticide</li> <li>• Moustiquaires grillagées aux fenêtres et portes</li> <li>• Répulsifs cutanés</li> </ul>
<p><b>Moyens de bonne efficacité :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Vêtements imprégnés d'insecticide</li> <li>• Diffuseur électrique d'insecticide (à l'intérieur)</li> </ul>
<p><b>Moyens d'efficacité relative :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Raquettes électriques</li> <li>• Pulvérisation intra-domiciliaire de « bombes » insecticides (disponibles dans le commerce)</li> <li>• Climatisation</li> <li>• Ventilation</li> <li>• Serpentin fumigène (extérieur)</li> <li>• Moustiquaire non imprégnée d'insecticide</li> </ul>
<p><b>Moyens inefficaces à ne pas utiliser :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• les bracelets anti-insectes pour se protéger des moustiques et des tiques ;</li> <li>• les huiles essentielles dont la durée d'efficacité, généralement inférieure à 20 minutes, est insuffisante ;</li> <li>• les appareils sonores à ultrasons, la vitamine B1, l'homéopathie, les rubans, papiers et autocollants gluants sans insecticide.</li> </ul>

Figure 16. Efficacité des moyens de prévention disponibles contre les piqûres de moustiques d'après le Haut Conseil de la Santé Publique 2019 (79)

#### f - Pistes de recherche

Les programmes de lutte contre les moustiques reposent souvent sur l'utilisation d'insecticides chimiques qui entraînent souvent l'apparition de résistances chez les vecteurs ainsi que d'autres problèmes tels que la pollution de l'environnement et la bioaccumulation au sein de la chaîne alimentaire. Ce phénomène engendre une altération de la santé des populations humaines et animales dans le monde entier, ainsi qu'une perte de biodiversité de manière plus générale. C'est pourquoi il est impératif de développer de nouvelles stratégies de lutte, comme de nouveaux insecticides respectueux de l'environnement. (80)

#### Protéines de liaison olfactive

Les protéines de liaison olfactive (OBP pour « odorant-binding proteins ») peuvent constituer une piste de recherche, tout comme les récepteurs des odeurs (OR pour

« odorant receptors »). Situées dans les antennes des insectes, les protéines de liaison olfactive seraient impliquées dans le transport des substances odorantes vers les récepteurs des odeurs. Cela permettrait la transmission de signaux spécifiques odorants agissant sur le plan comportemental.

Cette approche visant à interférer dans la voie olfactive des moustiques offre d'excellentes cibles dans la lutte antiparasitaire. L'insecte ne pouvant plus localiser sa proie, cela entraînerait une diminution du nombre de piqûres.

Toujours en phase de recherche pour concevoir des molécules de liaison spécifique, ce nouvel outil permettrait de réaliser des antagonistes forts afin d'améliorer les réponses comportementales souhaitées des insectes nuisibles. On pourrait également réduire l'utilisation d'insecticides et la résistance à ces produits qui en découle. (81)

### Phytothérapie

L'utilisation de certaines plantes, grâce à une partie de leurs composés, a permis l'obtention de résultats positifs quant à leur potentiel larvicide. On peut citer par exemple la menthe sylvestre (*Mentha longifolia*) (oxide de pipériténone), le cumin (*Cuminum cyminum*) ( $\rho$ -cymène,  $\beta$ -pinène, cuminaldéhyde), la camomille sauvage (*Matricaria recutita*) ( $\alpha$ -bisabolol) ou encore la coriandre (*Coriandrum sativum*) (linalool, 2,6-octadién-1-ol). Les résultats concernant le potentiel larvicide de ces composés végétaux ont été obtenus in vitro en laboratoire. L'efficacité in vivo, soit « en vie réelle », n'est pas garantie au vue du manque de connaissances scientifiques actuelles.

Ces produits présentent les avantages d'être bon marché, respectueux de l'environnement, biodégradables et sans danger pour les organismes non ciblés. Des efforts collectifs sont désormais nécessaires pour tirer parti des connaissances accumulées sur l'action phytochimique contre les moustiques. Il est de plus en plus évident que la combinaison de produits botaniques et de biopesticides entraînera une meilleure activité par rapport aux produits phytochimiques isolés.

A terme, on espère pouvoir les utiliser dans les programmes de lutte intégrée contre les parasites. (80)

### Nouvelles formulations galéniques

La formulation de chaque molécule active est aussi très importante car elle permet de libérer un produit avec une concentration idéale et qui dure dans le temps. Les

nouvelles formulations de répulsifs pour insectes sont basées sur la libération de systèmes tels que les micro et nanocapsules polymériques, les micro et les nanoparticules, les nanoémulsions/microémulsions, les liposomes, les hydrogels et les cyclodextrines (Figure 17). Les nouvelles formulations sont composées de matériaux tels que des polymères ou des lipides. En fonction des matériaux, diverses propriétés sont mises à profit : libération prolongée des actifs, augmentation de la sécurité de la formulation avec une meilleure stabilité du produit, meilleure tolérance cutanée avec diminution du passage systémique, faible coût, biodégradabilité... (74)

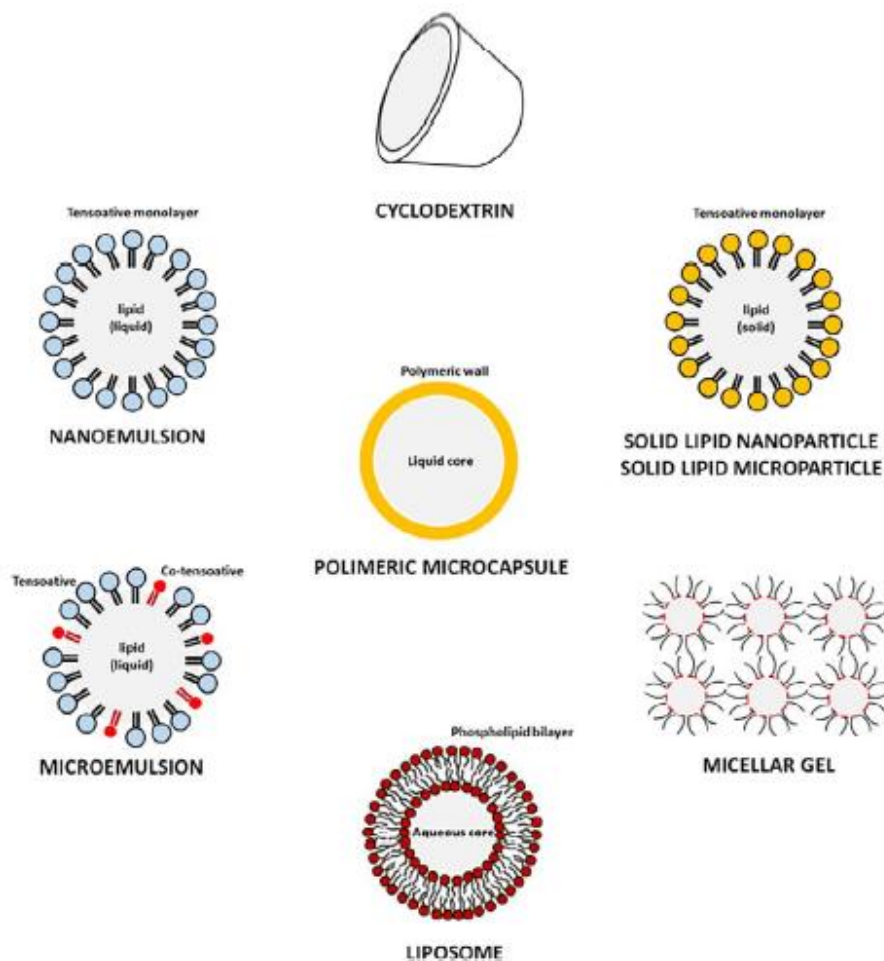


Figure 17. Systèmes de libération des molécules actives.

Nanoparticules lipidiques solides (noyau composé de matière lipidique solide et enveloppée d'une monocouche de tensioactif), nanoémulsions et microémulsions (noyau composé d'un matériau lipidique liquide enveloppé par une monocouche de tensioactif), polymère en micro ou nanocapsules (noyau pouvant être un matériau liquide enveloppé par une paroi polymère), liposome (noyau aqueux impliqué par une bicouche phospholipidique), gel micellaire nanostructuré (micelles formées par un tensioactif polymère avec des groupements micellaires gel formation de la structure) et cyclodextrines (cage moléculaire d'origine naturelle qui permet d'encapsuler diverses molécules) (74)

## 2 - Protection collective

### a - Action sur l'environnement

Pour éviter l'éclosion de nouveaux moustiques, il est important de commencer par supprimer autant que faire se peut les gîtes larvaires. Cette phase larvaire est courte, elle dure entre 4 et 6 jours après l'éclosion des œufs. Toute réserve d'eau stagnante à l'extérieur comme au sein des domiciles peut servir de lieu de ponte : soucoupes de pots de fleur, égouttoirs à vaisselle, récipients abandonnés, pneus, ... L'urbanisation procure des points d'entrées pour les espèces urbaines de moustiques : travaux, dépôts sauvages, mauvais écoulements d'eau pluviale, cimetières, ... La nature offre également des gîtes larvaires. Le creux d'un rocher ou une feuille permet la rétention d'un petit volume d'eau mais suffisant. En effet, peu d'eau permet à l'œuf de moustique de se développer.

Il est impossible de tout contrôler, cependant il est important de rester vigilant et d'appliquer quelques simples recommandations afin de limiter les gîtes larvaires :

- éliminer les réserves d'eau stagnante : déchets divers, pneus usagés, vases, coupelles et autres en veillant à verser l'eau sur un sol absorbant de façon à éviter la poursuite du cycle de l'insecte dans un endroit humide ;
- laver les récipients vidés d'eau stagnante pour y décoller les éventuels œufs restants ;
- changer l'eau des pots de fleur une fois par semaine, remplir les soucoupes de sable, cela permettra un maintien de l'humidité en évitant la stagnation d'eau ;
- vérifier le bon écoulement des eaux de pluie ou usagées, nettoyer régulièrement les gouttières et caniveaux ;
- protéger les réservoirs d'eau en les couvrant avec un tissu par exemple. (82)

Pour exemple la Figure 18 illustre la répartition des lieux de ponte d'*A. albopictus*.

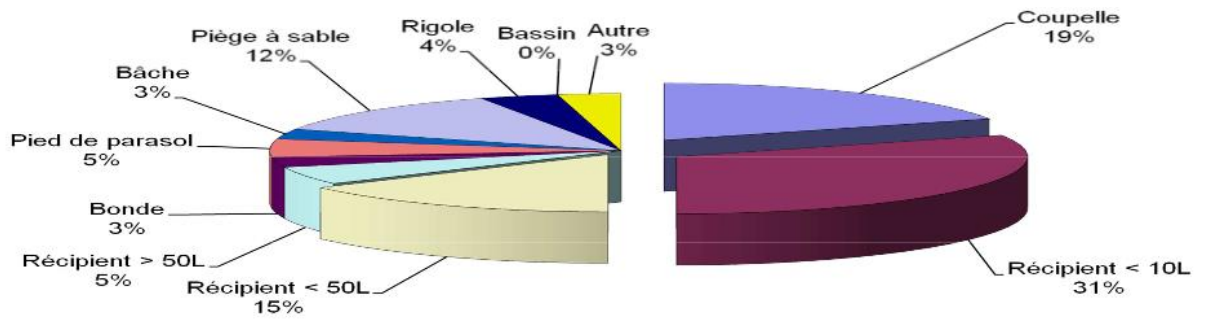


Figure 18. Répartition des lieux de ponte d'*Aedes albopictus* (83)

Les gîtes de reproduction d'*A. albopictus* sont en majorité fabriqués par l'Homme et se trouvent souvent au sein des habitations ou sur le domaine public. Il est impossible de les recenser tous, d'autant que beaucoup sont temporaires, aléatoires ou difficiles d'accès. C'est un moustique qui se déplace peu, allant jusqu'à une centaine de mètres autour du lieu de ponte.

La façon la plus efficace et radicale de se protéger des nuisances d'*A. albopictus* reste de supprimer, autant que possible, physiquement ces gîtes. (84)

#### b - Education sanitaire

L'éducation sanitaire est la clé de la prévention des maladies. Ici l'adhésion et l'implication de la population est primordiale car l'action de chacun a une répercussion sur la santé de tous. D'autant plus qu'on sait que la majorité des gîtes larvaires sont présents chez les particuliers. Pour convaincre chacun de l'intérêt d'agir, plusieurs actions et outils sont mis en place : articles de presse, sites web, réseaux sociaux, flyers, affiches, salons, évènements, animations scolaires, etc.

Evidemment les professionnels de santé ont leur rôle à jouer dans l'explication et la compréhension des mesures préventives contre les moustiques.

Divers organismes œuvrent à la création et au relais d'informations concernant la lutte anti-vectorielle, surtout depuis l'implantation du moustique tigre en France. On peut citer les EID ou Entente Interdépartementales de Démoustication, les ARS ou Agences Régionales de Santé ou encore l'INPES ou Institut National d'Education et de Prévention pour la Santé. En pharmacie les supports papiers à distribuer aux

patients sont très appréciés. Plusieurs plaquettes explicatives existent, des exemples sont présents en annexe 5.

#### c - Lutte chimique conventionnelle

##### Insecticides

Peu de substances larvicides et adulticides sont utilisées aujourd'hui en France. Celles autorisées sont le *Bacillus thuringiensis israelensis* dit Bti et la deltaméthrine.

Le Bti est une bactérie qui, grâce à la production de toxines, détruit la muqueuse intestinale des organismes cibles. Les lésions intestinales qui en découlent empêchent les larves de moustiques de s'alimenter et aboutissent à leur mort.

Le Bti fait partie des substances avec un des meilleurs profils toxicologiques et écotoxicologiques concernant son devenir dans l'environnement. Il a tout de même été constaté une certaine rémanence de la bactérie dans les zones d'épandage. De plus la bactérie n'est pas spécifique des larves de moustiques puisqu'elle s'attaque également à d'autres nématocères comme les chironomes qui sont des diptères non piqueurs représentant une denrée pour beaucoup d'espèces. Une répercussion a été également observée chez les espèces prédatrices telles que les araignées, les passereaux ou les hirondelles, qui voient une diminution et une modification de leurs ressources alimentaires à la suite de l'utilisation du Bti en Camargue. (85)

La deltaméthrine est un composé chimique de la famille des pyréthrinoïdes. Cet insecticide agit via son action neurotoxique. Malheureusement l'usage massif de deltaméthrine a conduit à l'apparition de résistances chez les moustiques.

Dans un communiqué en 2017, l'ANSES conclut que certaines substances actives pourraient être de potentielles alternatives à la deltaméthrine. Le bendiocarbe (carbamate) est une substance biocide approuvée au niveau européen, mais il n'existe pas de produit phytopharmaceutique en contenant en France. Le chlorpyrifos-méthyl (organophosphoré) n'est quant à lui pas inscrit dans les substances biocides pour raison administrative. Ce produit est approuvé en pulvérisation sur les cultures. Le dinotéfurane et l'imidaclopride (néonicotinoïdes) sont des molécules biocides approuvées au niveau européen, des demandes d'autorisation de mise sur le marché sont en cours pour l'utilisation de l'imidaclopride. Il n'existe pas de produit

commercialisé à partir du dinotéfurane.

L'utilisation de ces molécules nécessiterait des contraintes fortes en termes d'équipements de protection. Pour l'imidaclopride, des gants et une combinaison de type 6 sont nécessaires. Pour les trois autres substances actives considérées, les risques sont acceptables lorsque sont portés des gants, une combinaison de type 3 ou 4 et un masque. Utilisés aux doses pour la lutte anti-vectorielle, ce sont des molécules toxiques pour l'Homme ainsi que pour l'environnement. Le benbiocarbe et chorpyriphos-méthyl inhibent l'activité cholinestérase au niveau des globules rouges et du cerveau. Le dinofurane et l'imidaclopride peuvent entraîner une perte d'appétit avec diminution du poids. Concernant l'environnement, les risques pour les organismes non-cibles ne peuvent être exclus pour aucune substance, y compris la deltaméthrine. Les compartiments aquatiques sont les plus vulnérables. Ainsi, il convient de ne pas traiter aux abords des réserves d'eau et lors d'épisodes pluvieux. De plus, toutes ces molécules présentent une très forte toxicité pour les abeilles. Si l'une ou plusieurs de ces substances devaient être utilisées, il faudrait mettre en place des mesures d'impact pour l'environnement au moment des traitements de lutte anti-vectorielle. (86)

Étant donné leur potentielle écotoxicité et l'apparition de résistances chez les diptères, l'usage des insecticides à grande échelle ne semble pas constituer une méthode pérenne à moyen ou long terme. Les traitements adulticides doivent rester des moyens ponctuels destinés à éviter la propagation de maladies dans un cadre bien défini, en tenant compte du contexte épidémiologique et des conditions locales. (87)

#### d - Lutte biologique

##### Moustiques transgéniques

La technique de lâchers de moustiques génétiquement modifiés consiste à libérer des moustiques mâles porteurs d'un transgène codant un gène dominant entraînant la stérilité. C'est un gène artificiel préalablement modifié. Lors de l'accouplement avec des femelles sauvages, ce transgène passera chez de nombreux descendants. C'est ce que tente de faire la société britannique Oxitec avec des mâles *Aedes aegypti* baptisés OX513A qui sont d'une certaine manière stériles car les larves engendrées

ne peuvent survivre qu'en présence d'un antibiotique, la tétracycline. Un essai de grande ampleur a eu lieu au Brésil en 2014. Jusqu'à 4% de la descendance a cependant survécu et a pu engendrer une nouvelle génération à son tour. D'après des chercheurs de l'université de Yale aux USA, 10 à 60% des échantillons prélevés à 6, 12 et 24 mois sont des hybrides qui contiennent une partie de leur ADN légèrement modifié. (88) (89)

Les résultats sont donc pour le moment mitigés. Le nombre de moustiques a diminué mais une évaluation sanitaire reste à faire pour évaluer les répercussions de ces méthodes. On ne sait pas si le nombre de maladies véhiculées par les moustiques a diminué. Des études faites par des laboratoires indépendants sont nécessaires pour valider ou infirmer ces protocoles. De plus, l'extinction d'*A. aegypti* entrainerait la libération d'une niche écologique pouvant être colonisée par d'autres insectes, comme *A. albopictus*, également vecteurs de maladies. (88) (90)

#### Moustiques porteurs de bactérie Wolbachia

Une autre technique non OGM (Organisme Génétiquement Modifié) se base sur l'infection du moustique *A. aegypti* par une bactérie : Wolbachia. Elle est utilisée pour limiter la transmission d'arbovirus tels que ceux responsables de la dengue, de Zika ou encore du chikungunya.

La présence de la bactérie Wolbachia empêche la multiplication des arbovirus au sein de l'hôte, et de plus les moustiques femelles infectées passent la bactérie à leur descendance. Lors de l'accouplement d'un mâle non infecté par Wolbachia avec une femelle infectée, la descendance ne pourra pas voir le jour. Cela permet d'augmenter le nombre de moustiques porteurs de la bactérie et donc la résistance de la population de diptères à la dengue. Cette méthode ne semble pas avoir d'impact sur l'environnement, la population humaine ou les animaux. (91)

En Juillet 2019 l'institut Pasteur a organisé un lâcher de moustiques infectés par la bactérie en Nouvelle-Calédonie pour lutter contre l'épidémie de dengue. Le programme prévoyait de relâcher chaque semaine pendant six mois dans 3 500 points de la ville de Nouméa des moustiques porteurs de Wolbachia, puis de vérifier le déploiement de la bactérie dans la population de moustiques grâce aux pièges



installés. (92)

Cette méthode, mise au point depuis 6 ans, semble avoir déjà fait ses preuves en Australie, Brésil ou Indonésie. Il faut tout de même rester vigilant et évaluer ce que cela donnera sur le long terme.

### Les prédateurs

On peut se poser la question d'une lutte biologique avec les prédateurs naturels des moustiques. Plusieurs organismes vivants se nourrissent de ces diptères hématophages. L'utriculaire (*Utricularia vulgaris*), une plante carnivore, gobe les larves de moustiques tout comme la gambusie (*Gambusia affinis*), petit poisson d'eau douce ou saumâtre, ou encore les larves de libellules (*Libellula quadrimaculata*) qui aiment particulièrement les larves de moustiques. La méduse d'eau douce (*Craspedacusta sowerbyi*) est aussi un bon moyen de lutte biologique. Pour les formes adultes des moustiques, on peut citer les libellules, les chauves-souris, de nombreux oiseaux, les araignées ou encore les fourmis. (82) Ces prédateurs restent peu nombreux et fragiles face à la quantité de moustiques. Leur utilisation est donc limitée.

#### e - Gestion de la lutte anti-vectorielle et évaluation continue en France

Le Haut Conseil de la Santé Publique (HCSP) est une instance française chargée d'apporter une aide à la décision au ministre de la santé en réalisant des rapports et en formulant des recommandations. Cette instance permet d'avoir un avis éclairé concernant les moyens de lutte à utiliser contre les moustiques.

La politique générale menée contre les vecteurs de maladie, dont les moustiques, est menée par le ministère de la santé. Il s'appuie sur la Direction Générale de la Santé (DGS). En effet un de ses rôles est la communication en santé publique à destination des professionnels de santé et du grand public. Les actions sont coordonnées avec les agences régionales de santé (ARS). Elles mènent des actions de prévention en matière de santé, et assurent un rôle de veille sanitaire chacune dans leur région. (93)

L'ANSES s'est vu confier depuis le 1<sup>er</sup> janvier 2018 une mission d'expertise pour l'évaluation des risques et l'appui scientifique et technique dans le domaine des

vecteurs. Elle évalue les risques liés aux vecteurs et à la Lutte Anti-Vectorielle (LAV) avec les problématiques que soulèvent les biocides. Elle anime également un réseau d'experts de lutte contre les vecteurs et finance les projets de recherches dédiés à la connaissance des vecteurs ou de la LAV. (94)

Des organismes, indépendants les uns des autres, ont été créés dans certaines régions de France pour organiser la démoustication, le contrôle des nuisances biologiques et la gestion et observation des zones humides. Ce sont les EID, Entente Interdépartementale de Démoustication ; il existe l'EID Méditerranée et l'EID Rhône-Alpes. Elles sont financées en grande partie par les départements membres avec à travers eux une participation de communes incluses dans les arrêtés préfectoraux annuels. L'EID Atlantique a disparu depuis Janvier 2020, c'est désormais le département de la Charente-Maritime qui assure la continuité des missions de démoustication.

Il existe des syndicats agissants plus localement dans la surveillance et la lutte contre les moustiques, comme par exemple la Brigade Verte dans le Haut-Rhin ou le syndicat de lutte contre les moustiques dans le Bas-Rhin.

La lutte anti-vectorielle est variée, ses leviers sont complémentaires, en ajustement et évolution constante. A l'heure de la mondialisation et du changement climatique, nous devons mieux comprendre les mécanismes d'invasion et le risque d'émergence d'une nouvelle maladie infectieuse.

## CHAPITRE IV

# INCIDENCE DE L'EVOLUTION DU CLIMAT EN METROPOLE ET DES ECHANGES MONDIAUX



(95)

## Chapitre IV - Incidence de l'évolution du climat en métropole et des échanges mondiaux

Ces dernières décennies une évolution du climat se fait ressentir dans le monde entier, et la France n'est pas épargnée par le phénomène. Les répercussions sont diverses en fonction de l'endroit où l'on se trouve. Les modifications du climat vont entraîner des changements dans notre environnement proche même si l'analyse de ces effets s'avère délicate étant donné leur hétérogénéité.

Dans un premier temps nous allons nous intéresser à des données mesurables et aux prévisions concernant le climat futur, puis allons essayerons de comprendre quelles répercussions cela pourrait avoir sur la santé humaine et en particulier en lien avec la présence des moustiques.

### 1 - Évolution du climat en métropole et développement des échanges

#### a - Le changement climatique

##### Températures moyennes

Afin d'apprécier les tendances des changements climatiques, observons les relevés effectués par Météo France depuis les années 1900. L'évolution des températures moyennes en France montre un réchauffement depuis le début du siècle dernier. La tendance n'est pas uniforme, il y a une augmentation particulièrement marquée depuis les années 1980. Pour la période 1959-2009, on observe une élévation d'environ +0,3°C par décennie. Les trois années avec les températures moyennes les plus élevées ont été relevées au XXI<sup>ème</sup> siècle, en 2011, 2014 et 2018. La Figure 19 montre l'augmentation régulière de la courbe des températures moyennes annuelles glissantes sur 11 ans depuis 1900. Utilisant un second indicateur de référence basé sur la valeur moyenne de la période 1976-2005, les valeurs inférieures sont représentées en bâtons bleus, les valeurs supérieures en bâtons rouges. Nous n'observons plus d'année en « bleu » depuis 1990.

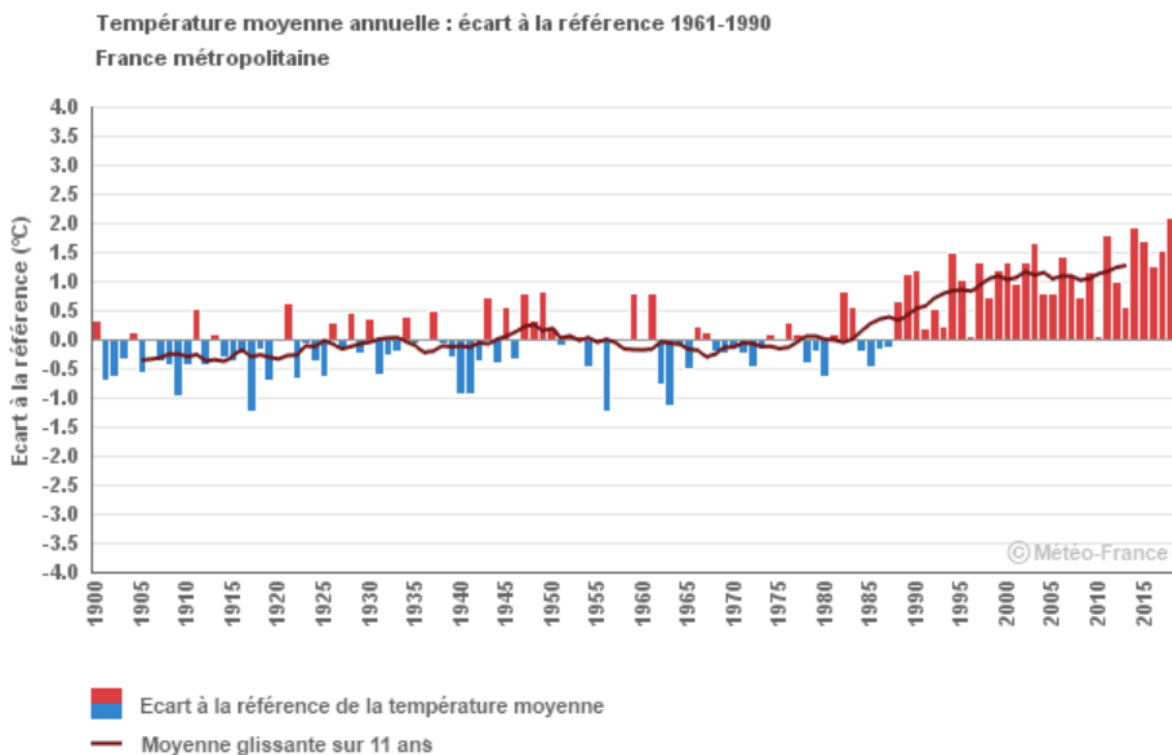


Figure 19. Evolution des températures moyennes annuelles en France métropolitaine depuis 1900 (96)

Les prévisions futures se basent sur plusieurs scénarii. Le climat de la Terre est le résultat d'interactions complexes entre de nombreux processus faisant intervenir l'atmosphère, l'océan et les surfaces continentales. Les climatologues observent l'évolution d'un modèle sous l'effet de perturbations, les forçages, auxquels on le soumet. Ces forçages sont soit naturels comme le soleil ou le volcanisme, soit anthropiques : tels les émissions de gaz à effet de serre (dioxyde de carbone, méthane, protoxyde d'azote...). C'est ainsi qu'en fonction de ces principaux paramètres le GIEC (Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat) a construit des scénarios aujourd'hui considérés comme des références scientifiques, dont les plus utilisés sont les RCP 2.6, RCP 4.5 et RCP 8.5. (97)

L'évolution de la température moyenne annuelle diffère significativement selon le scénario considéré mais la tendance au réchauffement jusqu'en 2050 reste tout de même constante. Les courbes fournies par Météo France sont présentées dans la Figure 20. Elles proviennent d'un projet Euro-Cordex qui met à disposition un ensemble de simulations climatiques en Europe. Elles sont basées sur des modèles globaux utilisés dans le dernier rapport du GIEC.

Pour analyser les futurs changements climatiques, les experts du GIEC ont défini dans leur 5<sup>ème</sup> rapport des trajectoires d'émissions et de concentrations de gaz à effet de serre, d'ozone et d'aérosols baptisés RCP pour « Representative Concentration Pathways » ou « Profils représentatifs d'évolution de concentration ». Ces RCP sont utilisés par les différentes équipes d'experts : climatologues, hydrologues, agronomes, économistes... Les climatologues en déduisent des projections climatiques globales ou régionales. Les RCP sont exprimés en termes de forçage radiatif en Watt/m<sup>2</sup>, soit en puissance par unité de surface pour l'année 2100. Par exemple, le RCP2.6 correspond à un forçage de +2.6 W/m<sup>2</sup> en 2100. Plus cette valeur est élevée, plus le système terre-atmosphère gagne en énergie et se réchauffe. (98)

Le seul scénario qui stabilise le réchauffement est le scénario RCP 2.6, lequel intègre une politique climatique visant à faire baisser les concentrations en CO<sub>2</sub>. Ce scénario est représenté par la courbe en trait plein rouge Bordeaux, c'est la température moyenne annuelle simulée par le modèle Aladin-Climat.

Le scénario RCP 4.5 correspond quant à lui à un scénario avec politiques climatiques visant à stabiliser les concentrations en CO<sub>2</sub>. Il résulte de la moyenne simulée par un ensemble de modèles Euro-cordex ; il est représenté par le panache orangé.

Dans le cas du scénario le plus pessimiste sans action politique climatique, soit le scénario RCP 8.5, le réchauffement pourrait atteindre 4°C à l'horizon 2071-2100. Ce panache représenté en violet est la température moyenne annuelle simulée par un ensemble de modèles Euro-cordex sur la période 2006-2100.

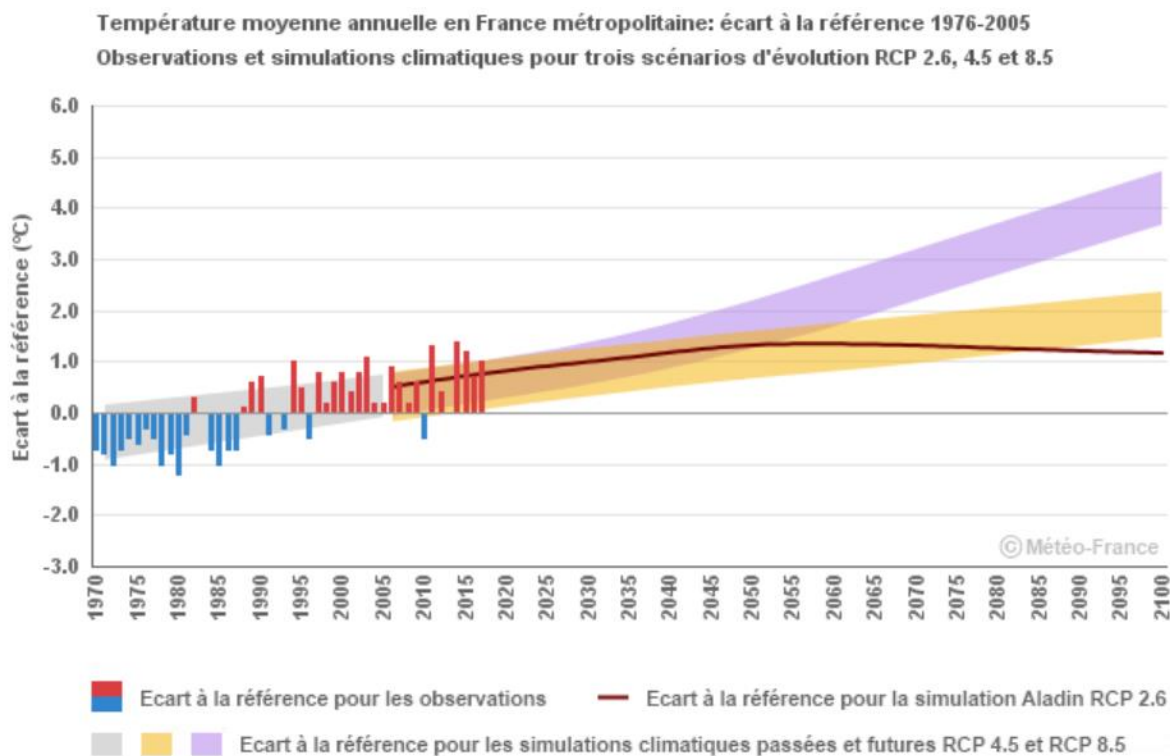


Figure 20. Projections climatiques en France métropolitaine suivant différents scénarios (96)

### Journées chaudes et vagues de froid

Quel que soit le scénario considéré, les projections climatiques montrent une augmentation du nombre annuel de journées chaudes sur l'ensemble du territoire métropolitain. C'est en lien avec la poursuite du changement climatique.

À l'horizon 2071-2100, selon le scénario RCP 4.5, cette augmentation serait de l'ordre de 18 jours par rapport à la période 1976-2005. Et d'après le RCP 8.5 on passerait à 47 jours. La Figure 21 donne une idée des régions les plus touchées par cette évolution des journées chaudes dans un horizon moyen et lointain. Plus la zone est rouge foncé, plus les prévisions tendent vers une augmentation des journées chaudes.

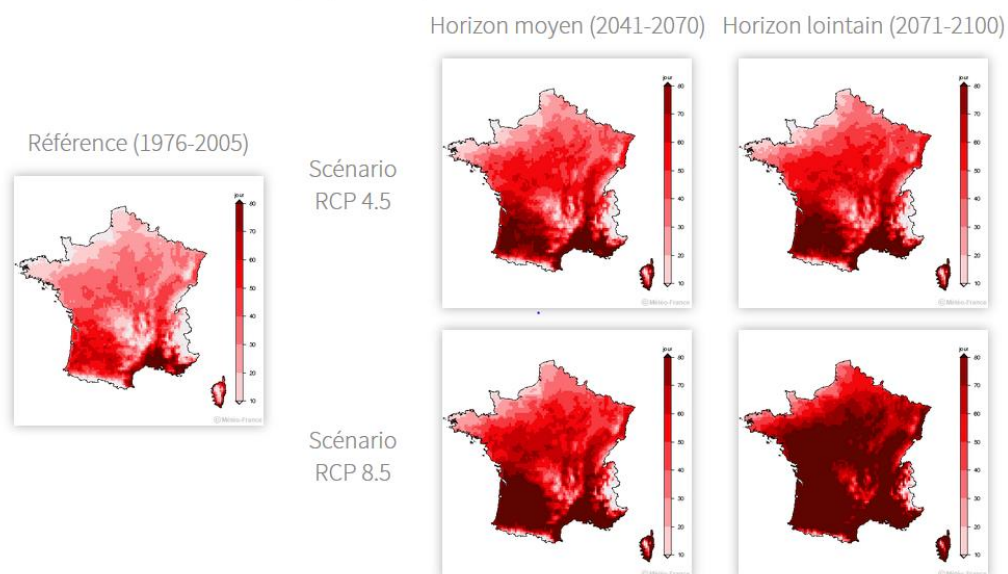


Figure 21. Simulations climatiques pour le climat futur avec les scénarios d'évolution RCP 4.5 et 8.5 (96)

Toujours par rapport à la période 1976-2005, les scénarii mettent en évidence une diminution des journées annuelles de gel sur le territoire pour 2071-2100. Elle est de l'ordre de 17 jours selon le scénario RCP 4.5, et de 27 jours selon le RCP 8.5.

Quant aux vagues de chaleur les estimations des divers scénarios prédisent une augmentation de leur fréquence et de leur sévérité. Dans un futur proche, 2021-2050, la fréquence pourrait doubler par rapport à 1981-2010, avec un allongement des épisodes et des pics de chaleurs plus élevés. Les prédictions pour la fin du siècle sont plus pessimistes selon le scénario RCP 8.5 avec une multiplication des vagues de chaleur par 5 de fin Mai à début Octobre. Les épisodes de plus d'un mois seraient fréquents avec des vagues ininterrompues pendant plus de mois. (96)

À la fin du XXI<sup>ème</sup> siècle, l'évolution des vagues de froid diffère sensiblement selon le scénario considéré. Selon le RCP 2.6, la fréquence des vagues de froid pourrait être divisée par deux par rapport au climat récent. La durée des épisodes ne devrait pas beaucoup évoluer, mais les événements les plus extrêmes pourraient s'accompagner de pics de froid un peu moins intenses que dans le climat récent. Selon le RCP 8.5, les vagues de froid pourraient devenir extrêmement rares.



## Précipitations et humidité du sol

Les précipitations semblent peu modifiées par rapport à ce qu'on connaît actuellement en moyenne en métropole, cela masque cependant des contrastes régionaux et saisonniers.

La comparaison du cycle annuel d'humidité du sol par rapport à la période 1961-1990 pour un avenir proche (2021-2050), ou lointain (2071-2100), montre un assèchement assez important en toute saison.

Sur la Figure 22, est représentée en orange la courbe moyenne d'humidité des sols sur la période de référence soit 1961-1990. En bleu, on a les records humides et en marron les records secs. Le scénario SRES A2 pour « Special Report on Emissions Scenarios » est le scénario pessimiste envisagé jusqu'au 4<sup>ème</sup> rapport du GIEC. Il est assez proche de l'actuel scénario RCP 8.5. Il est représenté avec la courbe violette, on note qu'elle est assez proche de la courbe marron. Cela signifie que l'humidité moyenne du sol en fin de siècle pourrait correspondre aux situations sèches extrêmes d'aujourd'hui. Cette évolution se traduit par un allongement moyen de la période de sol sec de l'ordre de 2 à 4 mois tandis que la période humide se réduit dans les mêmes proportions.

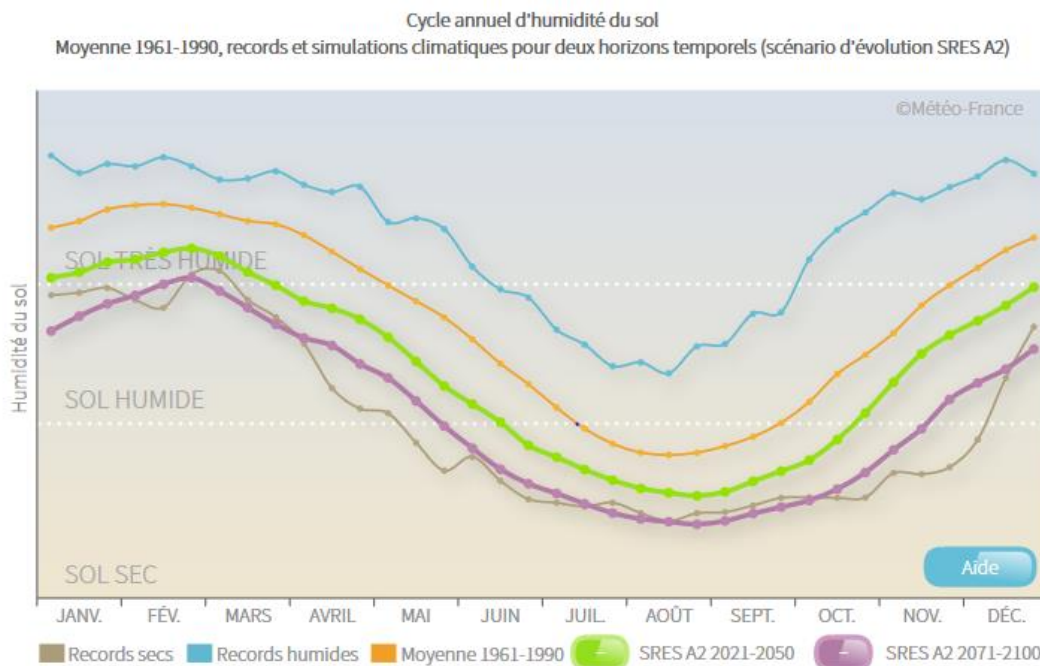


Figure 22. Un sol de plus en plus sec en toute saison (96)

## b - Evolution des échanges mondiaux

Les échanges internationaux sont en place depuis plusieurs siècles, ils s'accroissent cependant après la 2<sup>ème</sup> guerre mondiale. Depuis 1980 on parle de mondialisation avec la forte progression des importations/exportations de marchandises, services et mouvements de capitaux. Ces échanges se font majoritairement entre pays riches situés dans 3 principales régions : Amérique du Nord, Europe occidentale et Asie du Sud-Est. (99)

La Figure 23 montre la forte croissance de ces échanges, qui semblent s'intensifier d'années en années. On observe une multiplication par 6,8 du commerce mondial entre 1980 et 2017.

Dans le système économique actuel, la courbe des échanges (bleue) et celle de la création des richesses (orange) affichent le même sens de variation. Ce modèle de globalisation (internalisation des transactions industrielles, commerciales et financières, dans un contexte de libéralisation et d'intensification des échanges) dans lequel la croissance économique est entraînée par le développement des échanges est-il pérenne ?

On ne peut pas prédire l'évolution exacte de ces tendances car un événement perturbateur peut arriver à tout moment, comme ce la crise sanitaire liée au COVID-19 (Coronavirus Disease 2019) nous a enseigné.

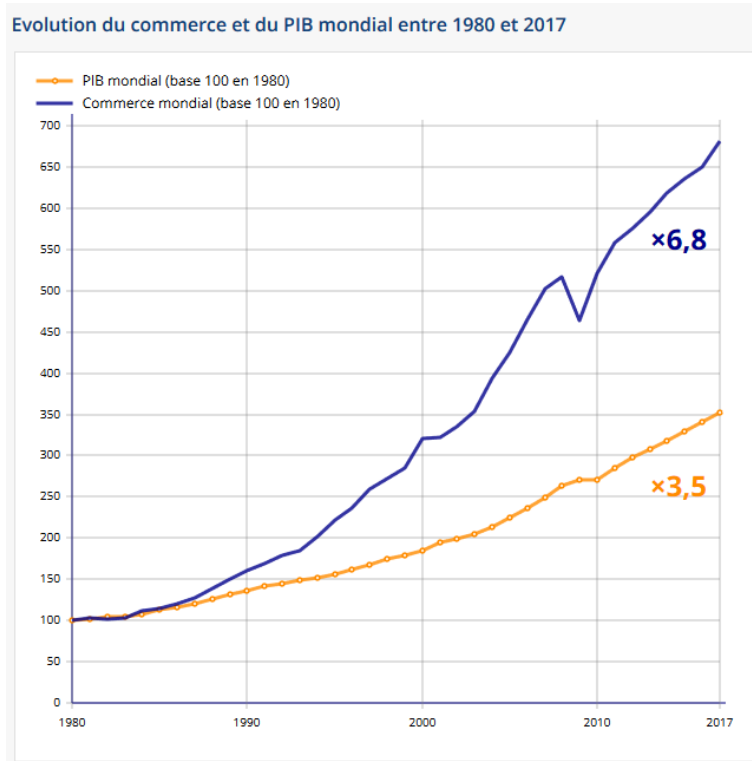


Figure 23. Evolution du commerce et du PIB (Produit Intérieur Brut) entre 1980 et 2017 (100)

La Figure 24 se focalise sur les transports aériens de personnes. On note une nette augmentation du flux de passagers d'année en année, avec une multiplication par 2 du nombre de passagers tous les 15 ans. La flotte mondiale représente 24 000 avions commerciaux transportant des passagers, avec en 2018, plus de 38 millions de vols. Chaque minute, 72 avions décollent dans le monde. Cette évolution cache cependant une forte disparité entre les régions du monde, les passagers sont en grande majorité issus de pays développés ou en développement. (101)

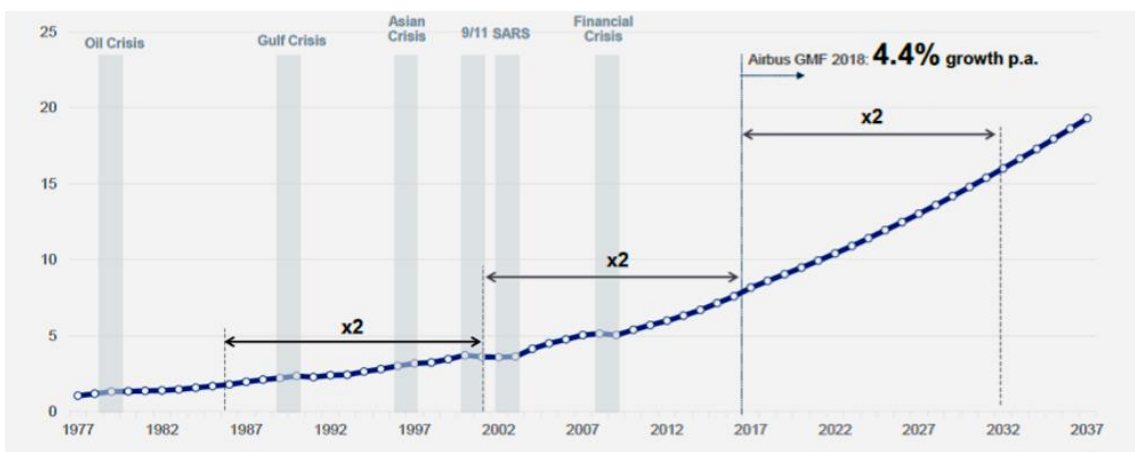


Figure 24. Doublement du trafic aérien tous les 15 ans (101)

En abscisses se trouve l'année, et en ordonnées le nombre de passagers exprimé en milliards d'individus. L'évolution n'est pas linéaire puisqu'on remarque que le trafic stagne lors de différentes crises : attentats du 11 Septembre 2001 aux Etats-Unis, crise financière en 2008 par exemple. L'estimation pour 2020 et peut être les années suivantes risque d'être erronée étant donné que le trafic a été très perturbé avec la crise sanitaire du COVID-19.

## 2 - Conséquences au niveau de la santé humaine

Chaque espèce évolue différemment selon les - nouvelles - conditions de vie qui lui sont imposées, que ce soit parce que les conditions changent autour d'elle ou parce que l'espèce a été déplacée. Cela est vrai pour toutes les espèces d'êtres vivants dont les moustiques.

### a - Changement climatique et développement

Face aux conditions de vie engendrées par le changement climatique, entre autres, les différentes espèces de moustiques sont impactées. Cependant elles ne vont pas toutes évoluer de la même façon. Nous allons nous concentrer ici sur *A.albopictus* et les maladies vectorielles transmises par cette espèce.

#### Maladies vectorielles

L'étude des comportements des différents systèmes vectoriels est très complexe. Des tendances se dégagent tout de même sur l'épidémiologie des vecteurs de maladies. Les impacts vont se faire ressentir au niveau des 3 composantes des systèmes vectoriels : les hôtes, les vecteurs et les parasites. Un changement chez l'un des 3 acteurs peut bouleverser les relations vectorielles. Les arthropodes sont très sensibles aux conditions environnementales et météorologiques, mais peuvent rentrer en diapause si les conditions ne conviennent pas à leur survie pour revenir ensuite. Cependant, si le vecteur et le parasite sont adaptés aux conditions locales, ils peuvent vite s'étendre sur de nouveaux territoires.

On s'attend à plusieurs changements avec les modifications prévues du climat, notamment sur :

- les répartitions des zones d'endémie et les disséminations des épidémies ;
- les saisons de circulation des vecteurs et des parasites ;
- l'intensité des transmissions, avec une répercussion sur l'incidence des maladies. (102)

### Exemple du vecteur *A.albopictus*

Il y a un risque majeur de poursuite de l'implantation d'*A.albopictus* dans les zones fortement urbanisées le long du réseau routier, vers le Nord et l'Ouest de la France.

(103) Certains facteurs climatiques sont particulièrement importants pour la présence d'*A.albopictus*, comme la température minimale du mois le plus froid ou la pluviométrie.

(104)

Les chercheurs entomologistes s'attendent à une modification de l'aire géographique d'*A.albopictus*, de leur densité, de leur cycle biologique, et de leur répartition annuelle.

(103)

La relation parasite-vecteur peut aussi être affectée par le changement climatique dans la durée d'incubation. Une augmentation des températures peut permettre au parasite véhiculé par le moustique d'être plus rapidement actif. En effet, la période d'incubation extrinsèque pour le virus de la dengue semble diminuer avec des températures entre 32-35°C pendant plusieurs jours.

De plus, les cycles de réplication des moustiques varient en fonction des conditions climatiques, ce qui peut engendrer une augmentation de la population de ce vecteur. Pour *A. albopictus* le cycle gonotrophique le plus court est autour de 30°C. Les chercheurs rapportent un cycle d'une durée moyenne de 3,5 jours, avec environ 3,9 cycles possibles dans la vie du diptère à cette température, alors qu'entre 20 et 27°C le cycle gonotrophique du moustique est de l'ordre de 11,2 jours. De plus, à une température de 30°C comparée à 21°C, les larves deviennent plus rapidement des adultes. En revanche, au-dessus de 40°C, l'activité des femelles semble très réduite. (105) Néanmoins, le taux de transmission peut diminuer si les parasites ou les vecteurs ne supportent pas ces nouvelles conditions climatiques.

L'incidence de la dengue est corrélée avec les saisons puisqu'elle est plus élevée lorsqu'il fait chaud et pluvieux, avec une propagation optimale pour une humidité supérieure à 60% et une température entre 24 et 31°C. Cela coïncide avec la forte présence du moustique, et montre que l'amplification du virus et celle du moustique sont optimales dans les mêmes conditions climatiques.

Le virus du West Nile semble également bénéficier de la hausse des températures pour mieux se propager puisqu'autour de 30°C la température affecte positivement sur son amplification. Malheureusement nous ne connaissons pas précisément l'effet de

la température sur plusieurs virus comme Zika ou le chikungunya. (105)

#### b - Echanges mondiaux et interactions sociales

Les échanges internationaux constituent de très bons transporteurs de maladies via le transit de personnes, de matériaux et d'animaux vecteurs. Nous avons déjà évoqué le cas du moustique tigre qui a pu se répandre à travers le monde grâce aux transports de pneus usagés notamment, puis il s'est disséminé en France métropolitaine le long des réseaux routiers via des transporteurs automobiles. Il n'est évidemment pas le seul animal à pouvoir bénéficier de ces transports.

Une épidémie est caractérisée lorsqu'on recense un grand nombre de cas d'une maladie transmissible apparaissant soudainement dans un espace donné. Elle peut être causée par différents agents pathogènes : virus, champignons, bactéries ou parasites, directement ou indirectement entre les Hommes et également au contact des animaux. Hormis les maladies vectorielles, les autres maladies épidémiques ont besoin des interactions sociales pour se propager. Plus les interactions sont importantes, nombreuses, fréquentes et rapides, plus le risque de déclenchement et de propagation de l'épidémie est fort. On comprend alors bien que les échanges mondiaux augmentent le risque d'épidémies ainsi que leur intensité. Les grandes concentrations d'individus que l'on retrouve en ville permettent à un agent pathogène l'accès à un grand réservoir d'hôtes potentiels. De plus, il peut évoluer plus vite, passant outre l'immunisation progressive des populations. L'histoire des épidémies est également liée aux transports, en permettant aux maladies d'aller plus loin et de toucher des populations non immunisées. Un des exemples les plus marquants est la conquête de l'Amérique par les espagnols. En effet, ils ont amené avec eux des germes de la rougeole, du typhus ou de la variole, lesquels décimèrent des populations. Avec la mondialisation, une épidémie se répand non seulement de proche en proche, mais aussi dans des zones plus lointaines. Les lieux fortement connectés au reste du monde ont plus de risque d'être touchés indépendamment de la distance entre avec le foyer de la maladie.

Lorsqu'une épidémie touche une large zone géographique comme un continent voire

le monde entier on parle de pandémie.

La première épidémie mondiale connue arrive avec l'accélération des échanges, c'est la grippe espagnole en 1918-1919, même si elle reste encore assez localisée. Puis en 1981 on voit apparaître le VIH (Virus de l'Immunodéficience Humaine). En 2002-2003, le SRAS (Syndrome Respiratoire Aigu Sévère) sévit puis en 2019 la COVID-19. (106) Après 1960, les épidémies ont tendance à amplifier leur expansion et deviennent de plus en plus pandémiques. Il semble y avoir une corrélation avec les transports aériens qui s'intensifient également sur cette période (Figure 25). (107)

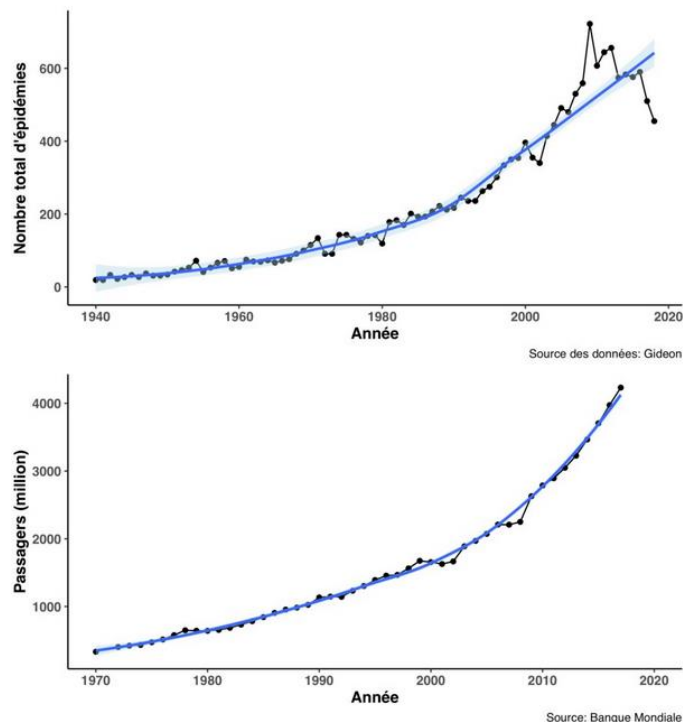


Figure 25. Graphique du haut : nombre d'épidémies de maladies infectieuses de 1940 à 2018.

Graphique du bas : trafic aérien de passagers de 1960 à 2017 (107)

Il est important de raisonner en logique mondiale et non nationale. Pour faire face à ces nouveaux fléaux, une politique sanitaire globale est indispensable pour lutter rapidement et au mieux contre ce risque devenu prédominant. Il faut être réactif et organisé pour tenter de ne pas se laisser déborder pas les phénomènes d'épidémies ou de maladies émergentes. De plus, il est crucial de ne pas sous-estimer les risques de la mondialisation et du changement climatique sur le transport de nouveaux agents pathogènes dans des zones vierges et sur leur vitesse de propagation.

Il est nécessaire de s'adapter sans cesse aux évolutions de notre monde, évolutions qui sont très rapides surtout en ce moment particulier. En effet, l'Homme consomme l'énergie de façon exponentielle ce qui lui permet d'accélérer ses déplacements, son rythme de vie, le rendement de ses productions... Le revers de la médaille est présent également, avec les conséquences aujourd'hui visibles de tout cela : changement climatique, modification de la biodiversité avec l'arrivée d'espèces invasives, la disparition de nombreuses espèces, l'émergence de maladies... A l'image de la théorie évolutive de la reine rouge, l'évolution est la clé de la survie. Mais encore faut-il suffisamment de temps pour permettre cette survie ce qui de nos jours est difficile voire peut-être impossible pour certaines espèces tant la course est rapide. Cette théorie a été imaginée d'après le livre « de l'Autre côté du Miroir » de Lewis Carol. Elle se situe au passage dans lequel Alice tient la Reine rouge par la main. Elle court, court et court encore et rien ne bouge autour. Alice dit : « Mais, Reine, nous courons et rien ne bouge ? » La reine répond : « Mais, Alice, si nous ne courons pas nous disparaissions ».

### 3 - Approche globale

Du fait des changements climatiques et de l'internationalisation des échanges notamment, les maladies vectorielles réapparaissent depuis plusieurs années : paludisme en Guyane et à Mayotte, dengue dans les départements français d'Amérique, à La Réunion et dans la région Pacifique, chikungunya dans l'Océan Indien. Le virus Zika a également émergé en 2015 en Amérique du Sud pour se diffuser ensuite en Guadeloupe, Guyane, Martinique. Le moustique tigre est implanté depuis 2004 en métropole et des cas importés ou autochtones de dengue, de chikungunya et de Zika sont régulièrement détectés dans des départements de la métropole. (108)

Dans ce contexte et en l'absence de vaccin et ou de traitement contre ces maladies, il est important de bien comprendre tous les paramètres influençant la dispersion de ces maladies pour pouvoir au mieux les atténuer.

Ainsi avoir une connaissance de la dispersion des populations de moustiques permettra d'appréhender plus aisément notre approche pour gérer au mieux les maladies qu'ils transmettent sur leur passage. Parmi les facteurs à prendre en compte,



en plus des facteurs climatiques, nous pouvons citer les facteurs socio-économiques et environnementaux. Pour illustrer cela, la Figure 26 présente un modèle conceptuel qui montre une approche systémique permettant de comprendre le risque de maladies transmises par les moustiques (MBD = « mosquito born diseases »). Les résultats de santé publique sont influencés par des interactions complexes entre l'environnement et le système socio-économique.

Il est important de développer des compétences appropriées et complémentaires, et de rassembler toutes les connaissances existantes, notamment en matière de recherche. En effet les connaissances acquises dans les régions du monde déjà touchées pourraient être transposables et adaptées aux régions tempérées dans le cadre de l'évolution du climat. C'est pourquoi il faut continuer à enrichir nos connaissances in vivo sur le terrain comme in vitro en laboratoire.

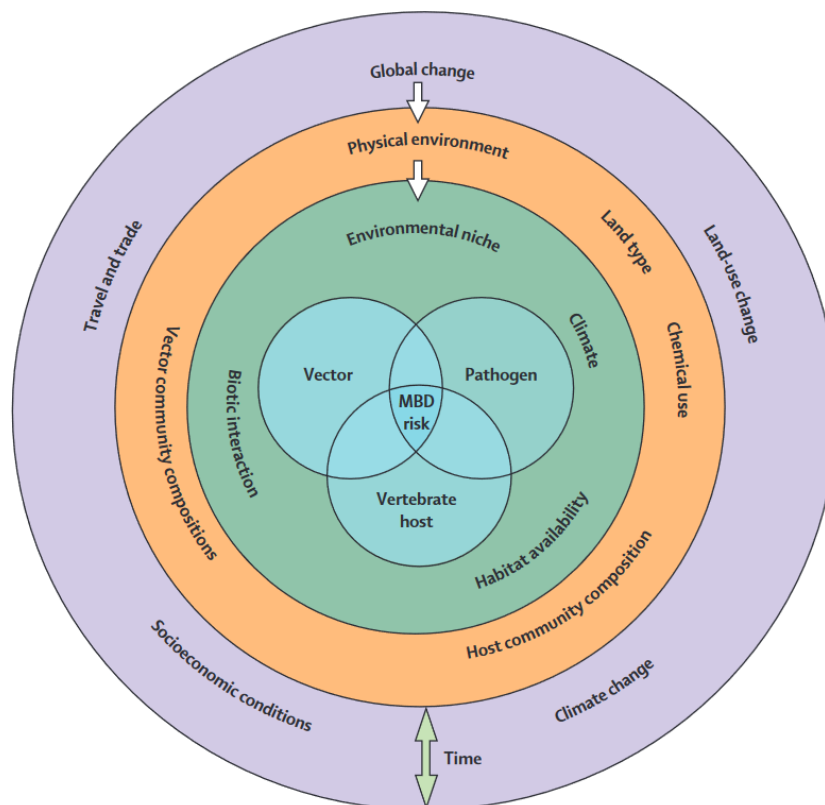


Figure 26. Approche systémique dynamique pour comprendre le risque de maladies transmises par les moustiques (MBD) d'après Lancet Infect Dis 2019 (55)

La création de modèles de la dynamique des systèmes facilite l'amélioration de la compréhension et les projections futures des maladies transmises par les moustiques. (109) In fine cela permettrait la mise au point d'outils de mesure permettant d'identifier,

d'anticiper, d'évaluer et d'atténuer les risques à un stade précoce. (110)

Il est temps pour les chercheurs de différents domaines de réunir leurs connaissances afin de porter la modélisation au niveau supérieur. En effet l'utilisation de modèles d'ensemble permet une meilleure fiabilité et l'évaluation des incertitudes.

Les passées et présentes pandémies mettent en exergue la nécessité de bien comprendre les paramètres influençant les maladies pour pouvoir les éviter ou sinon les gérer en limitant leur propagation.

La COVID 19 est un excellent exemple. Elle s'inscrit dans un contexte écologique et social de la crise de la biodiversité, du trafic d'animaux sauvages et de leur mise en élevage, d'une augmentation de l'urbanisation et enfin de la mondialisation des échanges et du tourisme. (107)

Pour une politique pertinente, il est nécessaire d'avoir une étroite collaboration entre les responsables politiques, les scientifiques, les acteurs de la santé publique et la population concernée. A défaut d'avoir pu faire l'objet d'un débat démocratique, les décisions prises dans l'urgence et les actions menées par les gouvernements doivent être soutenues également par la population pour être efficaces : quarantaine, confinement, dépistages, gestes sanitaires à adopter, etc. Grâce au transfert des connaissances au plus grand nombre d'entre nous, les citoyens participent grandement à la gestion de crise. C'est donc bien toute une chaîne d'acteurs qui contribue à la réussite ou à l'échec d'expansions d'épidémies.

Il y a également une notion d'échelle locale et globale. A l'échelle locale, il s'agit de déterminer l'origine de la maladie, les foyers infectieux et le mode de transmission en fonction des conditions environnementales et sociales. L'analyse globale concerne les mécanismes de propagation d'un petit cluster localisé à l'ensemble de la planète.

Cette crise sanitaire devrait nous aider à tirer des leçons pour gérer au mieux les futures épidémies et/ou pandémies.

## Conclusion

A l'heure de la perte de biodiversité et du changement climatique, où beaucoup d'espèces vivantes peinent à survivre, certaines espèces dont, nous l'avons vu, le moustique tigre, semble bien s'adapter au nouvel environnement créé par nos modes de vie.

Cet insecte hématophage, en plus d'être très agaçant, est aussi principalement un excellent vecteur de maladies au sein des populations humaines. Avec l'évolution du climat, il pourrait nous réserver des « surprises » en véhiculant des maladies aujourd'hui inexistantes en France métropolitaine. Il est tentant de vouloir le supprimer. Est-ce possible et à quel prix ? En saturant les eaux et les sols de produits phytosanitaires nocifs pour nombre d'espèces environnantes et nous-même ? Qui plus est cela favoriserait l'apparition d'insectes résistants à de tels produits. Et leur extermination laisserait une niche écologique vide, comblée inévitablement par une autre espèce qui pourrait potentiellement perturber encore plus les écosystèmes, avec peut-être de graves répercussions sur la santé humaine. Il faut se rappeler que les moustiques font partie intégrante de la biodiversité avec de multiples interactions au sein des écosystèmes. Ils exercent également des fonctions bénéfiques dans leur environnement et de par ce fait sur la santé humaine. Ils participent à la co-évolution, car moustique, Homme et virus interagissent, évoluent ensemble.

La meilleure alternative, et la plus durable, pourrait être de se protéger de cette espèce invasive sans perturber inutilement celle-ci et la biodiversité environnante. Pour cela, il est important d'informer les populations sur les risques véhiculés par l'insecte mais également ceux liés au dérèglement de notre environnement. Le pharmacien d'officine, devra expliquer les mesures de protection individuelles adéquates et autres gestes praticables pour limiter l'expansion du moustique.

Il faut garder en tête que le changement climatique n'est pas le seul facteur d'expansion d'espèces invasives, dont le moustique tigre. En réalité cela est bien plus complexe, les évolutions observées autour de nous dépendent également de facteurs écologiques et socio-économiques. Pour appréhender au mieux les phénomènes de changements comme l'émergence d'épidémies, il est important d'avoir une approche globale, systémique. Une expertise pluridisciplinaire intégrative des savoirs

scientifiques est nécessaire en lien avec l'expérience et le vécu des populations. Les personnes éduquées, éclairées, vivant dans des conditions décentes, peuvent participer au maintien de leur santé globale, tout en adaptant l'influence de leur mode de vie à la recherche de l'équilibre de leur environnement.

De par leur formation scientifique, les personnels en charge de la santé peuvent appréhender les déséquilibres planétaires en cours (changement climatique, dégradations des écosystèmes, pollutions diverses...) leurs causes et leurs répercussions néfastes. Ils sont également à même de transmettre leurs connaissances sur ces sujets et d'engager un dialogue avec les populations pour imaginer une évolution culturelle qui permette un nouvel « art de vie » plus en harmonie avec notre environnement. Notre santé d'aujourd'hui et de demain en dépend.

Espérons que la prise de conscience générée par la crise liée à la COVID-19 nous permettra de ne pas nous conforter dans nos travers de pays dits « en développement », mais bien de se questionner sur la nécessité de placer l'économie au premier plan plutôt que d'essayer de limiter voire inverser, pour les plus optimistes, l'impact environnemental.

## Bibliographie

1. Barbault R. La biodiversité du vivant. In: Biodiversité. Hachette; 1997. p. 9-24. (Les fondamentaux).
2. Biodiversité - Brochure biodiversité 2017 [Internet]. calameo.com. [cité 4 oct 2019]. Disponible sur: <https://www.calameo.com/books/0028015911b0ce9d9b0c5>
3. Biodiversité : présentation et enjeux [Internet]. Ministère de la transition écologique et solidaire. [cité 18 août 2019]. Disponible sur: <http://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/biodiversite-presentation-et-enjeux>
4. Barbault R. Biodiversité. Hachette Supérieur; 1997. 159 p.
5. Dajoz R. La diversité spécifique. In: La Biodiversité, l'avenir de la planète et de l'homme. Paris: ellipses; 2008. p. 31-48. (Parcours LMD).
6. Arthus-Bertrand Y. La biodiversité. Paris: La Martinière; 2010. 184 p.
7. 10004\_brochure-32p\_Biodiversite-s-explique\_web\_planches.pdf [Internet]. [cité 18 août 2019]. Disponible sur: [https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/10004\\_brochure-32p\\_Biodiversite-s-explique\\_web\\_planches.pdf](https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/10004_brochure-32p_Biodiversite-s-explique_web_planches.pdf)
8. Dirzo R, Young HS, Galetti M, Ceballos G, Isaac NJB, Collen B. Defaunation in the Anthropocene. *Science*. 25 juill 2014;345(6195):401-6.
9. Roche B. Biodiversité et maladies infectieuses: l'effet de dilution. In: Notre santé et la biodiversité. Buchet Chastel. Paris; 2013. p. 49-56.
10. atelier-IntroResilience.pdf [Internet]. [cité 29 août 2019]. Disponible sur: <http://www.environnement.ens.fr/IMG/file/jClause/atelier-IntroResilience.pdf>
11. Résilience (écologie). In: Wikipédia [Internet]. 2019 [cité 10 sept 2019]. Disponible sur: [https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=R%C3%A9silience\\_\(%C3%A9cologie\)&oldid=161624914](https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=R%C3%A9silience_(%C3%A9cologie)&oldid=161624914)
12. Isbell F, Craven D, Connolly J, Loreau M, Schmid B, Beierkuhnlein C. Biodiversity increases the resistance of ecosystem productivity to climate extremes. *Nature*. oct 2015;526(7574):574-7.
13. Dajoz R. Les services fournis par la biodiversité. In: Précis d'écologie. Dunod. Paris; 2006. p. 477-97. (Sciences Sup).
14. Robinson GR, Quinn JF, Stanton ML. Invasibility of experimental habitat islands in a california winter annual grassland. *Ecology*. avr 1995;76(3):786-94.
15. Tilman D. Community invasibility, recruitment limitation, and grassland biodiversity. *Ecology*. 1997;78(1):81-92.
16. Trevenec C, Morand S. Les dangers de l'élevage industriel: l'exemple des virus

- grippaux. In: Notre santé et la biodiversité. Paris: Buchet Chastel; 2013. p. 57-68.
17. Burdon JJ, Chilvers GA. Host density as a factor in plant disease ecology. *Annu Rev Phytopathol.* sept 1982;20(1):143-66.
  18. Connell JH. Diversity in tropical rain forests and coral reefs. *Science.* 24 mars 1978;199(4335):1302-10.
  19. Barneoud L. *La biodiversité?* Belin. Saint-Just-La-Pendue; 2013. 79 p. (Comprendre vite et mieux).
  20. Zones Humides [Internet]. [cité 14 sept 2019]. Disponible sur: <http://www.zones-humides.org/>
  21. Pollutions – Protégeons la biodiversité [Internet]. [cité 14 sept 2019]. Disponible sur: <http://www.biodiversitweb.fr/index.php/la-biodiversite-a-quoi-ca-sert/se-proteger-des-risques/pollutions/>
  22. Les végétaux et les lichens sentinelles de la qualité de l'air - Encyclopédie de l'environnement [Internet]. [cité 13 mai 2020]. Disponible sur: <https://www.encyclopedie-environnement.org/air/vegetaux-lichens-sentinelles-qualite-de-lair/>
  23. La biodiversité : présentation et enjeux [Internet]. Ministère de la transition écologique et solidaire. [cité 13 mai 2020]. Disponible sur: <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/biodiversite-presentation-et-enjeux>
  24. Dajoz R. Rôle et importance de la biodiversité. In: *La biodiversité l'avenir de la planète et de l'homme.* Paris: ellipses; 2008. p. 73-93.
  25. Biomimétisme – Protégeons la biodiversité [Internet]. [cité 15 sept 2019]. Disponible sur: <http://www.biodiversitweb.fr/index.php/la-biodiversite-a-quoi-ca-sert/innover/biomimetisme/>
  26. document.447.aspx.pdf [Internet]. [cité 14 sept 2019]. Disponible sur: <http://millenniumassessment.org/documents/document.447.aspx.pdf>
  27. Image : Khry'spresso du lundi 23 mars 2020, L'Internet pendant ... [Internet]. [cité 3 mai 2020]. Disponible sur: [https://www.google.fr/imgres?imgurl=https://mamot.fr/system/media\\_attachments/files/008/661/252/original/0b4760d7af39cc3d.jpg?1583671606&imgrefurl=https://framablog.org/tag/internet/page/2/?print%3Dpdf-search&h=699&w=720&tbnid=BRp6d75R6LYoiM&tbnh=221&tbnw=228&usq=AI4\\_kTeAnkhKEytoTWJXFIVogAUWnwcpQ&vet=1&docid=RgAEAaqUrntH7M&hl=fr](https://www.google.fr/imgres?imgurl=https://mamot.fr/system/media_attachments/files/008/661/252/original/0b4760d7af39cc3d.jpg?1583671606&imgrefurl=https://framablog.org/tag/internet/page/2/?print%3Dpdf-search&h=699&w=720&tbnid=BRp6d75R6LYoiM&tbnh=221&tbnw=228&usq=AI4_kTeAnkhKEytoTWJXFIVogAUWnwcpQ&vet=1&docid=RgAEAaqUrntH7M&hl=fr)
  28. Et si on éradiquait tous les moustiques ? *Le Monde.fr* [Internet]. 16 févr 2016 [cité 8 déc 2019]; Disponible sur: [https://www.lemonde.fr/planete/article/2016/02/16/et-si-on-eradiquait-tous-les-moustiques\\_5993446\\_3244.html](https://www.lemonde.fr/planete/article/2016/02/16/et-si-on-eradiquait-tous-les-moustiques_5993446_3244.html)
  29. Simard F. *Alerte aux moustiques?* scitep. 2016. 80 p.

30. Biologie - Ecologie | EID Mediterranee [Internet]. [cité 8 déc 2019]. Disponible sur: <http://www.eid-med.org/page/biologie-ecologie>
31. *Toxorhynchites*. In: Wikipédia [Internet]. 2019 [cité 14 mai 2020]. Disponible sur: <https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Toxorhynchites&oldid=159794355>
32. Courtioux B. Le moustique tigre, vigilance et conseils. Actual Pharm. 1 mai 2019;58(586):40-3.
33. Vacus G. Expansion géographique d'*Aedes albopictus* Quel risque de maladies émergentes en France métropolitaine ? 2012.
34. Les moustiques vecteurs d'arbovirus: une histoire sans fin | Biologie Aujourd'hui [Internet]. [cité 20 févr 2020]. Disponible sur: <https://www.biologie-journal.org/articles/jbio/abs/2018/02/jbio180026/jbio180026.html>
35. van Breugel F, Riffell J, Fairhall A, Dickinson MH. Mosquitoes use vision to associate odor plumes with thermal targets. Curr Biol. 17 août 2015;25(16):2123-9.
36. McBride CS. Genes and odors underlying the recent evolution of mosquito preference for humans. Curr Biol. 11 janv 2016;26(1):R41-6.
37. Fernández-Grandon GM, Gezan SA, Armour JAL, Pickett JA, Logan JG. Heritability of attractiveness to mosquitoes. Plos One. 22 avr 2015;10(4):e0122716.
38. Cardé RT. Multi-cue integration: how female mosquitoes locate a human host. Curr Biol. 21 sept 2015;25(18):R793-5.
39. Takken W, Verhulst NO. Host preferences of blood-feeding mosquitoes. Annu Rev Entomol. 7 janv 2013;58(1):433-53.
40. mares\_et\_moustiques.pdf [Internet]. [cité 5 févr 2020]. Disponible sur: [https://www.pram-grandest.fr/medias/fichiers/mares\\_et\\_moustiques.pdf](https://www.pram-grandest.fr/medias/fichiers/mares_et_moustiques.pdf)
41. Eutrophisation : Définition simple et facile du dictionnaire [Internet]. [cité 16 févr 2020]. Disponible sur: <https://www.linternaute.fr/dictionnaire/fr/definition/eutrophisation/>
42. Biodiversité. Imaginez un monde sans moustiques [Internet]. Courrier international. 2010 [cité 8 févr 2020]. Disponible sur: <https://www.courrierinternational.com/article/2010/12/09/imaginez-un-monde-sans-moustiques>
43. Qui dit été dit moustiques, mais à quoi servent-ils ? [Internet]. Franceinfo. 2013 [cité 18 mai 2020]. Disponible sur: [https://www.francetvinfo.fr/decouverte/vacances/qui-dit-ete-dit-moustiques-mais-a-quoi-servent-ils\\_372484.html](https://www.francetvinfo.fr/decouverte/vacances/qui-dit-ete-dit-moustiques-mais-a-quoi-servent-ils_372484.html)
44. Maladies à transmission vectorielle [Internet]. [cité 12 févr 2020]. Disponible sur: <https://www.who.int/fr/news-room/fact-sheets/detail/vector-borne-diseases>

45. Fang J. Ecology: A world without mosquitoes. *Nature*. juill 2010;466(7305):432-4.
46. Et si on éradiquait tous les moustiques ? Le Monde.fr [Internet]. 16 févr 2016 [cité 29 mars 2020]; Disponible sur: [https://www.lemonde.fr/planete/article/2016/02/16/et-si-on-eradiquait-tous-les-moustiques\\_5993446\\_3244.html](https://www.lemonde.fr/planete/article/2016/02/16/et-si-on-eradiquait-tous-les-moustiques_5993446_3244.html)
47. CNEV-Ft-Fev2016-Rapport\_Changement\_climatique\_et\_maladies\_vectorielles.pdf [Internet]. [cité 22 janv 2020]. Disponible sur: [https://www.anses.fr/fr/system/files/CNEV-Ft-Fev2016-Rapport\\_Changement\\_climatique\\_et\\_maladies\\_vectorielles.pdf](https://www.anses.fr/fr/system/files/CNEV-Ft-Fev2016-Rapport_Changement_climatique_et_maladies_vectorielles.pdf)
48. Caminade C, Medlock JM, Ducheyne E, McIntyre KM, Leach S, Baylis M, et al. Suitability of european climate for the asian tiger mosquito *Aedes albopictus*: recent trends and future scenarios. *J R Soc Interface*. 7 oct 2012;9(75):2708-17.
49. Jia P, Chen X, Chen J, Lu L, Liu Q, Tan X. How does the dengue vector mosquito *Aedes albopictus* respond to global warming? *Parasit Vectors*. déc 2017;10(1):140.
50. Fischer D, Thomas SM, Neteler M, Tjaden NB, Beierkuhnlein C. Climatic suitability of *Aedes albopictus* in Europe referring to climate change projections: comparison of mechanistic and correlative niche modelling approaches. *Eurosurveillance*. 13 févr 2014;19(6):20696.
51. Failloux A-B, Hervé J-P. Chapitre 1 : Bio-écologie et compétence vectorielle *Aedes aegypti*. In: Corriveau R, Philippon B, Yébakima A, éditeurs. *La dengue dans les départements français d'Amérique* [Internet]. IRD Éditions; 2003 [cité 14 mai 2020]. p. 3-15. Disponible sur: <http://books.openedition.org/irdeditions/2705>
52. Bechini L. *Piqures de moustiques, un risque sanitaire à ne pas négliger*. Marseille; 2017.
53. Nazareth T, Seixas G, Sousa CA. Climate change and mosquito-borne diseases. In: Leal Filho W, Azeiteiro UM, Alves F, éditeurs. *Climate change and health: improving resilience and reducing risks* [Internet]. Cham: Springer International Publishing; 2016 [cité 22 janv 2020]. p. 187-99. (Climate change management). Disponible sur: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-24660-4\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-319-24660-4_12)
54. Franklinos LHV, Jones KE, Redding DW, Abubakar I. The effect of global change on mosquito-borne disease. *Lancet Infect Dis*. 1 sept 2019;19(9):e302-12.
55. Cailly P. Modélisation de la dynamique spatio-temporelle d'une population de moustiques, sources de nuisances et vecteurs d'agents pathogènes. :152.
56. Maneerat S, Daudé É. Étude par simulation à base d'agents des effets des discontinuités intra-urbaines à Delhi sur la dispersion des moustiques *Aedes aegypti*, vecteurs de la dengue, de la fièvre jaune, du chikungunya et du virus Zika. *Cybergeo Eur J Geogr* [Internet]. 24 mai 2017 [cité 14 févr 2020]; Disponible sur: <http://journals.openedition.org/cybergeo/28078>



57. Moulay D, Aziz-Alaoui MA, Cadivel M. The chikungunya disease: modeling, vector and transmission global dynamics. *Math Biosci.* 1 janv 2011;229(1):50-63.
58. McCann S. Asian tiger mosquito [Internet]. 2006 [cité 29 mars 2020]. Disponible sur: <https://www.flickr.com/photos/deadmike/170729124/>
59. DGS\_Céline.M, DGS\_Céline.M. Cartes de présence du moustique tigre (*Aedes albopictus*) en France métropolitaine [Internet]. Ministère des Solidarités et de la Santé. 2020 [cité 8 mars 2020]. Disponible sur: <https://solidarites-sante.gouv.fr/sante-et-environnement/risques-microbiologiques-physiques-et-chimiques/especes-nuisibles-et-parasites/article/cartes-de-presence-du-moustique-tigre-aedes-albopictus-en-france-metropolitaine>
60. Moustique-tigre : quand la mondialisation s'invite sur votre balcon. *Le Monde.fr* [Internet]. 17 août 2019 [cité 29 mars 2020]; Disponible sur: [https://www.lemonde.fr/planete/article/2019/08/17/moustique-tigre-quand-la-mondialisation-s-invite-sur-votre-balcon\\_5500280\\_3244.html](https://www.lemonde.fr/planete/article/2019/08/17/moustique-tigre-quand-la-mondialisation-s-invite-sur-votre-balcon_5500280_3244.html)
61. Rund SSC, Bonar NA, Champion MM, Ghazi JP, Houk CM, Leming MT. Daily rhythms in antennal protein and olfactory sensitivity in the malaria mosquito *Anopheles gambiae*. *Nature.* 29 août 2013;3(1):2494.
62. Chikungunya [Internet]. Institut Pasteur. 2015 [cité 3 févr 2020]. Disponible sur: <https://www.pasteur.fr/fr/centre-medical/fiches-maladies/chikungunya>
63. Dengue [Internet]. Institut Pasteur. 2016 [cité 3 févr 2020]. Disponible sur: <https://www.pasteur.fr/fr/centre-medical/fiches-maladies/dengue>
64. Zika [Internet]. Institut Pasteur. 2016 [cité 3 févr 2020]. Disponible sur: <https://www.pasteur.fr/fr/centre-medical/fiches-maladies/zika>
65. Maladies virales transmises par le moustique tigre [Internet]. [cité 3 févr 2020]. Disponible sur: <http://www.auvergne-rhone-alpes.ars.sante.fr/maladies-virales-transmises-par-le-moustique-tigre>
66. Calba - Arboviroses données de surveillance pour anticip.pdf [Internet]. [cité 1 févr 2020]. Disponible sur: [http://beh.santepubliquefrance.fr/beh/2019/19-20/pdf/2019\\_19-20.pdf](http://beh.santepubliquefrance.fr/beh/2019/19-20/pdf/2019_19-20.pdf)
67. L'heure du biocide [Internet]. La Salamandre. [cité 14 mai 2020]. Disponible sur: <https://www.salamandre.org/article/biocide-anti-moustiques/>
68. Darriet F. La lutte contre les moustiques nuisant et vecteurs de maladies: l'évaluation de nouveaux insecticides utilisables contre les moustiques en Afrique tropicale. Paris: Ed. Karthala ; Ed. de l'ORSTOM; 1998. 114 p.
69. Duvallet G, Gentile L de. Protection personnelle antivectorielle. Paris: IRD Editions; 2012.
70. Insect repellents: Historical perspectives and new developments - *Journal of the American Academy of Dermatology* [Internet]. [cité 20 févr 2020]. Disponible sur: [https://www.jaad.org/article/S0190-9622\(07\)01467-3/fulltext](https://www.jaad.org/article/S0190-9622(07)01467-3/fulltext)

71. Utiliser des répulsifs cutanés - EurekaSanté par VIDAL [Internet]. EurekaSanté. [cité 1 mars 2020]. Disponible sur: <https://eurekasante.vidal.fr/voyage/avant-voyage/protection-insectes.html>
72. Katz TM, Miller JH, Hebert AA. Insect repellents: Historical perspectives and new developments. *J Am Acad Dermatol*. 1 mai 2008;58(5):865-71.
73. Piqûres de moustiques et morsures de tiques : prévention individuelle [Internet]. [cité 10 mars 2020]. Disponible sur: <https://www.prescrire.org/Fr/3/31/52212/0/2016/ArchiveNewsDetails.aspx>
74. Tavares M, da Silva MRM, de Oliveira de Siqueira LB, Rodrigues RAS, Bodjolle-d'Almeida L, dos Santos EP, et al. Trends in insect repellent formulations: A review. *Int J Pharm*. 25 mars 2018;539(1):190-209.
75. Nguyen Q-BD, Vu M-AN, Hebert AA. Insect Repellents: An Updated Review for the Clinician. *J Am Acad Dermatol* [Internet]. 3 nov 2018 [cité 1 mars 2020]; Disponible sur: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S019096221832824X>
76. Fradin MS, Day JF. Comparative efficacy of insect repellents against mosquito bites [Internet]. <http://dx.doi.org/10.1056/NEJMoa011699>. Massachusetts Medical Society; 2009 [cité 26 avr 2020]. Disponible sur: [https://www.nejm.org/doi/10.1056/NEJMoa011699?url\\_ver=Z39.88-2003&rfr\\_id=ori%3Arid%3Acrossref.org&rfr\\_dat=cr\\_pub%3Dwww.ncbi.nlm.nih.gov](https://www.nejm.org/doi/10.1056/NEJMoa011699?url_ver=Z39.88-2003&rfr_id=ori%3Arid%3Acrossref.org&rfr_dat=cr_pub%3Dwww.ncbi.nlm.nih.gov)
77. Nouveaux types de moustiquaires imprégnées d'insecticide [Internet]. [cité 23 avr 2020]. Disponible sur: <https://www.who.int/fr/news-room/q-a-detail/new-types-of-insecticide-treated-nets>
78. [Recommandations\\_repulsifs\\_biocides\\_anti\\_moustiques\\_fev\\_2014.pdf](#) [Internet]. [cité 24 avr 2020]. Disponible sur: [https://solidarites-sante.gouv.fr/IMG/pdf/Recommandations\\_repulsifs\\_biocides\\_anti\\_moustiques\\_fev\\_2014.pdf](https://solidarites-sante.gouv.fr/IMG/pdf/Recommandations_repulsifs_biocides_anti_moustiques_fev_2014.pdf)
79. [Protection contre les piqûres de moustiques et de tiques.pdf](#) [Internet]. [cité 29 avr 2020]. Disponible sur: [https://www.pasteur-lille.fr/vaccinations-voyages/fiches\\_recommandations/PROTECTION\\_CONTRE\\_LES\\_PIQURES\\_DE\\_MOUSTIQUES\\_ET\\_DE\\_TIQUES.pdf](https://www.pasteur-lille.fr/vaccinations-voyages/fiches_recommandations/PROTECTION_CONTRE_LES_PIQURES_DE_MOUSTIQUES_ET_DE_TIQUES.pdf)
80. Senthil-Nathan S. A review of resistance mechanisms of synthetic insecticides and botanicals, phytochemicals, and essential oils as alternative larvicidal agents against mosquitoes. *Front Physiol* [Internet]. 2020 [cité 26 avr 2020];10. Disponible sur: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fphys.2019.01591/full>
81. Venthur H, Zhou J-J. Odorant receptors and odorant-binding proteins as insect pest control targets: a comparative analysis. *Front Physiol* [Internet]. 24 août 2018 [cité 24 avr 2020];9. Disponible sur: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6117247/>
82. Simard F, Farraudière L, Yebakima A. Alertes aux moustiques? Paris: SCITEP

éditions; 2016.

83. Formation 26 nov 2018 [Internet]. [cité 3 mai 2020]. Disponible sur: <https://www.eid-rhonealpes.com/lorem-ipsum/99-formation-26-nov-2018>
84. cir\_44478.pdf [Internet]. [cité 23 févr 2020]. Disponible sur: [http://circulaire.legifrance.gouv.fr/pdf/2019/03/cir\\_44478.pdf](http://circulaire.legifrance.gouv.fr/pdf/2019/03/cir_44478.pdf)
85. Poulin B. Les impacts du bacille de thuringe sur l'environnement. Zones Humides Infos. 2016;(92-93):31.
86. BIOC2016SA0132.pdf [Internet]. [cité 19 avr 2020]. Disponible sur: <https://www.anses.fr/fr/system/files/BIOC2016SA0132.pdf>
87. Insecticides utilisables pour la lutte anti-vectorielle | Anses - Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail [Internet]. [cité 19 avr 2020]. Disponible sur: <https://www.anses.fr/fr/content/insecticides-utilisables-pour-la-lutte-anti-vectorielle>
88. Bécherel S. Les moustiques transgéniques sont-ils vraiment l'arme infaillible contre la dengue ? [Internet]. 2019 [cité 20 avr 2020]. Disponible sur: <https://www.franceinter.fr/les-moustiques-transgeniques-sont-ils-vraiment-l-arme-infaillible-contre-la-dengue>
89. Transgenic *Aedes aegypti* mosquitoes transfer genes into a natural population | Scientific Reports [Internet]. [cité 20 avr 2020]. Disponible sur: <https://www.nature.com/articles/s41598-019-49660-6>
90. Moustiques OGM, une arme à double tranchant [Internet]. [cité 20 avr 2020]. Disponible sur: <https://www.franceinter.fr/emissions/futur-proche/futur-proche-09-juin-2017>
91. France: l'espoir de voir bientôt disparaître la dengue à Nouméa [Internet]. RFI. 2017 [cité 21 avr 2020]. Disponible sur: <http://www.rfi.fr/fr/science/20170112-france-noumea-espoir-voir-bientot-disparaitre-dengue-wolbachia>
92. Wolbachia, une bactérie pour lutter contre la dengue [Internet]. Institut Pasteur. 2019 [cité 21 avr 2020]. Disponible sur: <https://www.pasteur.fr/fr/institut-pasteur/institut-pasteur-monde/actualites/wolbachia-bacterie-lutter-contre-dengue>
93. DICOM\_Jocelyne.M. Organisation de la direction générale de la santé (DGS) [Internet]. Ministère des Solidarités et de la Santé. 2020 [cité 30 avr 2020]. Disponible sur: <http://solidarites-sante.gouv.fr/ministere/organisation/organisation-des-directions-et-services/article/organisation-de-la-direction-generale-de-la-sante-dgs>
94. Expertise sur les vecteurs | Anses - Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail [Internet]. [cité 30 avr 2020]. Disponible sur: <https://www.anses.fr/fr/content/expertise-sur-les-vecteurs>
95. « Je cogite donc je suis... »: A tous les climato-sceptiques\* [Internet]. Je cogite donc je suis... 2013 [cité 18 mai 2020]. Disponible sur:

<http://jecogitedoncjesuis.blogspot.com/2013/10/a-tous-les-climato-sceptiques.html>

96. ClimatHD : le climat passé et futur en France – Une application de Météo-France [Internet]. [cité 5 mai 2020]. Disponible sur: <http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/climathd>
97. Les travaux pour comprendre et anticiper le changement climatique [Internet]. [cité 17 juin 2020]. Disponible sur: <http://education.meteofrance.fr/dossiers-thematiques/l-evolution-du-climat/les-travaux-pour-comprendre-et-anticiper-le-changement-climatique#>
98. Les scénarios du GIEC [Internet]. [cité 5 mai 2020]. Disponible sur: <http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/le-giec-groupe-dexperts-intergouvernemental-sur-levolution-du-climat/les-scenarios-du-giec>
99. L'évolution des échanges internationaux [Internet]. MAXICOURS. [cité 8 mai 2020]. Disponible sur: <https://www.maxicours.com/se/cours/l-evolution-des-echanges-internationaux/>
100. Mondialisation | Insee [Internet]. [cité 8 mai 2020]. Disponible sur: <https://www.insee.fr/fr/statistiques/3633242>
101. Chiambaretto P. Trafic aérien mondial, une croissance fulgurante pas prête de s'arrêter [Internet]. The Conversation. [cité 26 mai 2020]. Disponible sur: <http://theconversation.com/trafic-aerien-mondial-une-croissance-fulgurante-pas-prete-de-sarreter-116107>
102. Le parasite, le moustique, l'homme, et les autres... : essai sur l'éco-épidémiologie des maladies à vecteurs [Internet]. France Culture. [cité 10 mai 2020]. Disponible sur: <https://www.franceculture.fr/oeuvre/le-parasite-le-moustique-lhomme-et-les-autres-essai-sur-leco-epidemiologie-des-maladies>
103. Semenza JC, Suk JE. Vector-borne diseases and climate change: a European perspective. *FEMS Microbiol Lett.* 01 2018;365(2).
104. Roche B, Léger L, L'Ambert G, Lacour G, Foussadier R, Besnard G, et al. The Spread of *Aedes albopictus* in metropolitan France: contribution of environmental drivers and human activities and predictions for a near future. *Plos One.* 11 mai 2015;10(5):e0125600.
105. Reinhold JM, Lazzari CR, Lahondère C. Effects of the environmental temperature on *Aedes aegypti* and *Aedes albopictus* mosquitoes: A Review. *Insects.* 6 nov 2018;9(4).
106. Vilaça - Ce que les épidémies nous disent sur la mondialisa.pdf [Internet]. [cité 26 mai 2020]. Disponible sur: <http://cafe-geo.net/wp-content/uploads/epidemies-mondialisation.pdf>
107. T A. RO11 : Enjeux et défis socio-écologiques face à la récurrence des épidémies, par Serge Morand [Internet]. *sfecologie.org.* [cité 27 mai 2020]. Disponible sur: <https://www.sfecologie.org/regard/ro11-mai-2020-s-morand-social>

108. La lutte anti-vectorielle | Anses - Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail [Internet]. [cité 26 mai 2020]. Disponible sur: <https://www.anses.fr/fr/content/la-lutte-anti-vectorielle>
109. Franklino LHV, Jones KE, Redding DW, Abubakar I. The effect of global change on mosquito-borne disease. *Lancet Infect Dis.* sept 2019;19(9):e302-12.
110. Mosquito-Borne Diseases: Advances in Modelling Climate-Change Impacts. *Trends Parasitol.* 1 mars 2018;34(3):227-45.
111. The culicidae (diptera): a review of taxonomy, classification and phylogeny [Internet]. ResearchGate. [cité 16 janv 2020]. Disponible sur: [https://www.researchgate.net/publication/228358790\\_The\\_Culicidae\\_Diptera\\_A\\_Review\\_Of\\_Taxonomy\\_Classification\\_And\\_Phylogeny/figures?lo=1](https://www.researchgate.net/publication/228358790_The_Culicidae_Diptera_A_Review_Of_Taxonomy_Classification_And_Phylogeny/figures?lo=1)
112. tableau\_des\_recommandations\_repulsifs\_anti\_moustiques\_311215.pdf [Internet]. [cité 28 avr 2020]. Disponible sur: [https://solidarites-sante.gouv.fr/IMG/pdf/tableau\\_des\\_recommandations\\_repulsifs\\_anti\\_moustiques\\_311215.pdf](https://solidarites-sante.gouv.fr/IMG/pdf/tableau_des_recommandations_repulsifs_anti_moustiques_311215.pdf)
113. Moustique tigre « *Aedes albopictus* » et lutte anti-vectorielle [Internet]. [cité 2 mai 2020]. Disponible sur: <http://www.nouvelle-aquitaine.ars.sante.fr/moustique-tigre-aedes-albopictus-et-lutte-anti-vectorielle>
114. moustique-tigre-supprimer-ponte.jpg (Image JPEG, 2388 × 2329 pixels) - Redimensionnée (32%) [Internet]. [cité 2 mai 2020]. Disponible sur: <https://www.biot.fr/wp-content/uploads/2016/06/moustique-tigre-supprimer-ponte.jpg>
115. Soquet N. Prévention contre le moustique tigre [Internet]. Biot. 2018 [cité 2 mai 2020]. Disponible sur: <https://www.biot.fr/prevention-moustique-tigre/>

## ANNEXES

**ANNEXE 1** : Sous-familles de moustiques d'après « The Culicidae (Diptera): a review of taxonomy, classification and phylogeny », RALPH E. HARBACH, 2007 (111)

Subfamily Tribe	Genera	Number of subgenera	Number of species	Distribution
<b>Anophelinae</b>	<i>Anopheles</i>	7	455	Cosmopolitan
	<i>Bironella</i>	3	8	Australasian
	<i>Chagasia</i>	—	4	Neotropical
<b>Culicinae</b>				
Aedeomyiini	<i>Aedeomyia</i>	2	6	Afrotropical, Australasian, Oriental, Neotropical
Aedini	<i>Aedes</i>	23	363	Old World, Nearctic
	<i>Armigeres</i>	2	58	Australasian, Oriental
	<i>Ayurakitia</i>	—	2	Oriental
	<i>Borichinda</i>	—	1	Oriental
	<i>Eretmapodites</i>	—	48	Afrotropical
	<i>Haemagogus</i>	2	28	Principally Neotropical
	<i>Heizmannia</i>	2	39	Oriental
	<i>Ochlerotatus</i>	22	550	Cosmopolitan
	<i>Opifex</i>	—	1	New Zealand
	<i>Psorophora</i>	3	48	New World
	<i>Udaya</i>	—	3	Oriental
	<i>Verrallina</i>	3	95	Principally Australasian, Oriental
	<i>Zeugomyia</i>	—	4	Oriental
	Culicini	<i>Culex</i>	23	763
<i>Deinocerites</i>		—	18	Principally Neotropical
<i>Galindomyia</i>		—	1	Neotropical
<i>Lutzia</i>		3	7	Afrotropical, Australasian, Oriental, Neotropical, eastern Palaearctic
Culisetini	<i>Culiseta</i>	7	37	Old World, Nearctic
Ficalbiini	<i>Ficalbia</i>	—	8	Afrotropical, Oriental
	<i>Mimomyia</i>	3	44	Afrotropical, Australasian, Oriental
Hodgesiini	<i>Hodgesia</i>	—	11	Afrotropical, Australasian, Oriental
Mansoniini	<i>Coquillettidia</i>	3	57	Old World, Neotropical
	<i>Mansonia</i>	2	23	Old World, Neotropical
Orthopodomyiini	<i>Orthopodomyia</i>	—	38	Afrotropical, Nearctic, Neotropical, Oriental, Palaearctic
Sabethini	<i>Isostomyia</i>	—	4	Neotropical

Subfamily Tribe	Genera	Number of subgenera	Number of species	Distribution
	<i>Johnbelkinia</i>	–	3	Neotropical
	<i>Kimia</i>	–	5	Oriental
	<i>Limatus</i>	–	8	Neotropical
	<i>Malaya</i>	–	12	Afrotropical, Australasian, Oriental
	<i>Maorigoeldia</i>	–	1	New Zealand
	<i>Onirion</i>	–	7	Neotropical
	<i>Runchomyia</i>	2	7	Neotropical
	<i>Sabethes</i>	5	38	Neotropical
	<i>Shannoniana</i>	–	3	Neotropical
	<i>Topomyia</i>	2	54	Principally Oriental
	<i>Trichoprosopon</i>	–	13	Neotropical
	<i>Tripteroides</i>	5	122	Principally Australasian, Oriental
	<i>Wyeomyia</i>	15	140	Principally Neotropical
Toxorhynchitini	<i>Toxorhynchites</i>	4	88	Afrotropical, Australasian, Neotropical, eastern Palearctic, Oriental
Uranotaeniini	<i>Uranotaenia</i>	2	265	Afrotropical, Australasian, Oriental, Neotropical

**ANNEXE 2 :** Nombre de signalements et de cas importés de chikungunya, dengue et d'infections à virus Zika notifiés dans les 42 départements colonisés par *Aedes albopictus*, France métropolitaine, 01 mai-30 novembre 2018 (66)

Région et département de signalement	Signalements				Cas confirmés ou probables importés				
	Nombre total	%	dont importés	%	Chikungunya	Dengue	Zika	Flavivirus	Total
<b>Provence-Alpes-Côte d'Azur</b>	<b>440</b>	<b>53,8</b>	<b>136</b>	<b>31,0</b>	<b>4</b>	<b>62</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>66</b>
04-Alpes-de-Haute-Provence	19	2,3	5	1,1	0	3	0	0	3
05-Hautes-Alpes	4	0,5	3	0,7	0	2	0	0	2
06-Alpes-Maritimes	72	8,8	28	6,4	3	12	0	0	15
13-Bouches-du-Rhône	86	10,5	46	10,5	1	25	0	0	26
83-Var	248	30,3	48	10,9	0	16	0	0	16
84-Vaucluse	11	1,3	6	1,4	0	4	0	0	4
<b>Auvergne-Rhône-Alpes</b>	<b>117</b>	<b>14,3</b>	<b>94</b>	<b>21,4</b>	<b>1</b>	<b>33</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>34</b>
01-Ain	8	1,0	6	1,4	0	4	0	0	4
07-Ardèche	9	1,1	5	1,1	0	2	0	0	2
26-Drôme	5	0,6	4	0,9	0	2	0	0	2
38-Isère	30	3,7	22	5,0	0	10	0	0	10
69-Rhône	51	6,2	46	10,5	1	10	0	0	11
73-Savoie	14	1,7	11	2,5	0	5	0	0	5
<b>Occitanie</b>	<b>109</b>	<b>13,3</b>	<b>82</b>	<b>18,7</b>	<b>2</b>	<b>35</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>37</b>
09-Ariège	3	0,4	3	0,7	0	2	0	0	2
11-Aude	2	0,2	2	0,5	0	1	0	0	1
12-Aveyron	5	0,6	5	1,1	0	1	0	0	1
30-Gard	12	1,5	9	2,1	0	5	0	0	5
31-Haute-Garonne	27	3,3	21	4,8	0	13	0	0	13
32-Gers	2	0,2	2	0,5	0	2	0	0	2
34-Hérault	38	4,6	24	5,5	1	7	0	0	8
46-Lot	1	0,1	1	0,2	0	1	0	0	1
48-Lozère	1	0,1	1	0,2	0	0	0	0	0
65-Hautes Pyrénées	0	0,0	0	0,0	0	0	0	0	0
66-Pyrénées-Orientales	12	1,5	9	2,1	1	2	0	0	3
81-Tarn	3	0,4	2	0,5	0	1	0	0	1
82-Tarn-et-Garonne	3	0,4	3	0,7	0	0	0	0	0
<b>Nouvelle-Aquitaine</b>	<b>56</b>	<b>6,8</b>	<b>45</b>	<b>10,3</b>	<b>0</b>	<b>16</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>16</b>
19-Corrèze	3	0,4	3	0,7	0	1	0	0	1
24-Dordogne	1	0,1	0	0,0	0	0	0	0	0
33-Gironde	42	5,1	36	8,2	0	11	0	0	11
40-Landes	3	0,4	1	0,2	0	0	0	0	0
47-Lot-et-Garonne	2	0,2	1	0,2	0	0	0	0	0
64-Pyrénées-Atlantiques	5	0,6	4	0,9	0	4	0	0	4
<b>Ile-de-France</b>	<b>44</b>	<b>5,4</b>	<b>42</b>	<b>9,6</b>	<b>0</b>	<b>32</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>34</b>
92-Hauts-de-Seine	29	3,5	29	6,6	0	20	0	1	21
94-Val-de-Marne	15	1,8	13	3,0	0	12	1	0	13
<b>Grand-Est</b>	<b>19</b>	<b>2,3</b>	<b>14</b>	<b>3,2</b>	<b>0</b>	<b>9</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>9</b>
67-Bas-Rhin	16	2,0	12	2,7	0	7	0	0	7
68-Haut-Rhin	3	0,4	2	0,5	0	2	0	0	2
<b>Bourgogne-Franche-Comté</b>	<b>10</b>	<b>1,2</b>	<b>9</b>	<b>2,1</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
71-Saône-et-Loire	10	1,2	9	2,1	0	0	0	0	0
<b>Corse</b>	<b>8</b>	<b>1,0</b>	<b>6</b>	<b>1,4</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>1</b>
2A-Corse-du-Sud	7	0,9	6	1,4	0	1	0	0	1
2B-Haute-Corse	1	0,1	0	0,0	0	0	0	0	0
<b>Pays de la Loire</b>	<b>14</b>	<b>1,7</b>	<b>11</b>	<b>2,5</b>	<b>0</b>	<b>9</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>9</b>
49-Maine-et-Loire	8	1,0	7	1,6	0	7	0	0	7
85-Vendée	6	0,7	4	0,9	0	2	0	0	2
<b>Centre-Val-de-Loire</b>	<b>1</b>	<b>0,1</b>	<b>0</b>	<b>0,0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
36-Indre	1	0,1	0	0,0	0	0	0	0	0
<b>Hauts-de-France</b>	<b>0</b>	<b>0,0</b>	<b>0</b>	<b>0,0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
02-Aisne	0	0,0	0	0,0	0	0	0	0	0
<b>Total</b>	<b>818</b>	<b>100,0</b>	<b>439</b>	<b>100,0</b>	<b>7</b>	<b>197</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>206</b>



**ANNEXE 3 :** Répulsifs recommandés pour la protection contre les piqûres d'arthropodes (hors araignées, scorpions, scolopendres et hyménoptères) : composition, nom commercial, présentation et mode d'utilisation d'après le HCSP au 24 avril 2015. (112)

Substance active et concentration	Nom commercial et présentation (liste non exhaustive, donnée à titre indicatif et ne constituant pas une recommandation officielle des produits)	Nombre maximal d'application(s) quotidien(ne)s					
		A partir de 6 mois et tant que l'enfant ne marche pas	Dès que l'enfant marche et jusqu' à 24 mois	> 24 mois à 12 ans	> 12 ans	Femmes enceintes	
DEET <sup>1,2,3</sup> (N,N-diéthyl-1-m-toluamide)	20% King® gel insectifuge	1	2	2	3	3	
	25% Insect Ecran® famille (spray)	1	2	2	3	3	
	30% Moustidose® lotion répulsive zones infestées (lotion), Moustifluid® zones à hauts risques (spray), Prébutix® lotion répulsive zone tropicale (lotion)	1	2	2	3	3	
IR3535 <sup>4</sup> (N-acétyl-N-butyl-β-alanine d'éthyle)	34% Ultrathon® répulsif insectes (crème ou spray)   Bushman® répulsif (roll-on-gel, dry-gel ou atomiseur)	X	X	X	3	X	
	50% Insect Ecran® zones infestées adultes (spray)   Biovector® Tropic 2	X	X	X	3	X	
20%	Moustifluid® lotion zone tempérée, Moustifluid® jeunes enfants, Moustifluid® lingettes, Moustikologue® haute tolérance (lotion), Picoso® anti-moustiques, Vapo les botaniques insectes® (spray), Vendome® adultes (spray), Apaisyl® répulsif moustique, Aptonia® spray antimoustique, Marie Rose® spray antimoustique Zen1, Marie Rose® spray répulsif antimoustique 8h, Kapo® répulsif corporel (spray), Tropic lotion répulsive insectes piqueurs, SagaCaraiibes®, Flash frais anti moustique Quiès®, Prébutix® lait corporel répulsif, Moustiro® antimoustiques, Moustikill® spray antimoustique, Cinq sur cinq® famille, Mediceis® Spray répulsif anti-moustiques, Label® Spray répulsif anti-moustiques, PicSun AntiMoustiques, Pyrel® lotion anti-moustiques, Parazeet® Zones tropicales Peaux Sensibles, Vulcano® spray anti moustiques	1	2	2	3	3	

<sup>1</sup> En cas d'exposition aux anophèles vecteurs des *Plasmodium*, agents du paludisme, la concentration minimale efficace de DEET est de 30%.

<sup>2</sup> Le DEET a fait l'objet d'une expertise au niveau européen dans le cadre de la Directive biocides 98/8/CE, une restriction d'usage est émise chez l'enfant de moins de 2 ans. Cependant, en cas de risque élevé de transmission d'une maladie vectorielle, il est utilisable sur une période courte en respectant scrupuleusement le nombre d'applications maximum admis et les conditions pratiques d'usage chez l'enfant.

<sup>3</sup> Les produits contenant du DEET vont bientôt faire l'objet d'une AMM. Les recommandations sur le nombre d'applications seront précisées sur l'AMM

<sup>4</sup> L'IR3535, le picaridine et le PMDRBO sont en cours d'évaluation au niveau européen.

IR3535 (N-acétyl-N-butyl-β-alaninate d'éthyle)	25%	Cinq sur cinq® zones tempérées (lotion), Cinq sur cinq® Tropic enfants (lotion), Prebutix® gel roll'on répulsif extrême zones tropicales, Prebutix® lotion répulsive zone Europe (spray, roll-on), Moustifluid® lotion haute protection zones tropicales et à risques, Manouka® lotion (ou roll-on) zone tropicale, Akipik® lotion anti insectes, Anti-moustiques Steripan®	X	X	2	3	3	3
	30%	Bouclier Insect® spray, Moustifluid® zones tropicales et à risques lotion haute-protection, Moustifluid® kit de protection extrême, Mediceis® Spray répulsif anti-moustiques tropique, Stopiq® bouclier extrême	X	X	2	3	3	3
	35%	Cinq sur Cinq® Tropic (lotion)	X	X	2	3	3	3
KBR3023 <sup>4</sup> (Carboxylate de Sec-butyl 2-(2-hydroxyéthyl) piperidine-1 / icardine)	20%	Centaurat® (spray), Insect écran® répulsif peau enfant ou famille, Mosquito guard® (spray), Répuls' Total® (émulsion), Apaisyl® répulsif moustiques haute-protection, Autan® Protection Plus lotion, Autan® active spray, Doctan® classique, Skin2P Body®, Insect free®	X	X	2	3	3	3
	25%	Insect écran® spécial tropiques (spray), Moustidose® lait répulsif famille (lait), Moustikologne® protection extrême (lotion), Prebutix® lotion répulsive spécial voyageurs, Doctan® ultra, Mousticologne® special zones infestées (lotion)	X	X	2	3	3	X
	19 à 20%	Mousticare® spray peau, spray famille, lingettes repulsives, Biovector® naturel (spray), Orphea® antimoustique (lotion et spray), Anti-piqûre Puresentielle® (spray), Phytosun aromas® répulsif moustiques (spray)	1	2	2	3	3	X
PMDRBO <sup>4</sup> (mélange de cis- et trans-p-menthane-3,8 diol)	25%	Mousticare® zones infestées (spray), Mosi-guard® naturel (spray et stick), Spray peau Penn'ly® Bio (dosé à 50%)	1	2	2	3	X	

Tableau établi à partir des données de déclaration des produits biocides du Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie, et des recommandations de bonne pratique clinique sur la « protection personnelle antivectorielle » établies par la Société de médecine de médecine des voyages et la Société française de parasitologie, label HAS<sup>1</sup>.

Pendant la période transitoire actuelle, les produits mentionnés ne peuvent encore être évalués selon les exigences de la directive européenne Biocides et sont commercialisés sous la responsabilité des fabricants. Compte tenu des changements possibles dans les formulations mises sur le marché, il convient de s'assurer de la composition exacte du produit et de ses modalités d'utilisation avant son acquisition sur <http://simbad.fr/public/serveur/produit/list.html>?

**Il est fortement recommandé de ne pas utiliser :**

- les bracelets anti-insectes pour se protéger des moustiques et des tiques ;
- les huiles essentielles dont la durée d'efficacité, généralement inférieure à 20 minutes, est insuffisante ;
- les appareils sonores à ultrasons, la vitamine B1, l'homéopathie, les raquettes électriques, les rubans, papiers et autocollants gluants sans insecticide.

<sup>1</sup> Disponible sur <http://www.medicine-voyages.fr/publications/bravetextecourt.pdf>

## ANNEXE 4 : Principales huiles essentielles répulsives et leur spectre d'action (74)

Essential oil	Plant	Active compound	Mosquito
Citronella	<i>Cymbopogon sp</i>	Citronellal	<i>Ae. Aegypti</i>
Lemon eucalyptus	<i>Corymbia citriodora</i>	Citronellal, p-menthane-3,4-diol, citronellol, limonene	<i>Ae. Aegypti</i> <i>An. Dirus</i>
Pepper mint	<i>Mentha piperita</i>	Menthol	<i>Ae. Aegypti</i>
Garlic	<i>Allium sativum</i>	Ajoene	<i>Ae. Aegypti</i>
Cinnamon	<i>Cinnamomum zeylanicum</i>	Cinnamaldehyde	<i>Ae. Aegypti</i>
Lemongrass	<i>Cymbopogon citratus</i>	Citral	<i>Ae. Aegypti</i>
Orange	<i>Citrus sinensis</i>	d- Limonene	<i>Cx. quinquefasciatus</i>
Eucalyptus	<i>Eucalyptus globules</i>	1,8 Cineole	<i>Ae. Aegypti</i>
Lemon Eucalyptus	<i>Eucalyptus citriodora</i>	p-Menthane-3,8-diol (PMD)	<i>Ae. aegypti</i> <i>Cx. quinquefasciatus</i>
Sweet Basil	<i>Ocimum basilicum</i>	citral, limonene, geranium acid and a-camphorene	<i>Ae. aegypti</i>
Limonella	<i>Zanthoxylum limonella</i>	p-Menthane-3,8-diol (PMD)	<i>Ae. aegypti</i> <i>Cx. quinquefasciatus</i>
Kunzea	<i>Kunzea ambigua</i>	alphapinene and 1,8 cineole	<i>Ae. aegypti</i>
Patchouli	<i>Pogostemon cablin</i>	patchouli alcohol	<i>Ae. aegypti</i> <i>Cx. quinquefasciatus</i>
Basil	<i>Ocimum spp</i>	Linalool	<i>An. Dirus</i>
Neem	<i>Azadirachta indica</i>	Not established	<i>Ae. aegypti</i> <i>Cx. quinquefasciatus</i>
Paspasf	<i>H. suaveolens</i>	$\beta$ -caryophyllene	<i>Anopheles spp</i>
Catnip	<i>Nepeia cataria L.)</i>	Nepetalactone	<i>Ae. vigilax, Cx. annulirostris, and Cx. Quinquefasciatus</i>
Wild Tomato Plant	<i>Lycopersicon hisutum</i>	2-undecanone	<i>Ae. aegypti</i> <i>Cx. quinquefasciatus</i>
Citronella	<i>Cymbopogon winterianus</i>	citronellal, geraniol, citronellol	<i>Ae. aegypti</i> <i>Cx. quinquefasciatus</i>
Clove	<i>Syzygium aromaticum</i>	eugenol	<i>Ae. aegypti</i> <i>Cx. quinquefasciatus</i>
Lippia	<i>Lippia organoides</i>	carvacrol	<i>Ae. aegypti</i>
Conyza	<i>Conyza newii</i>	perillaldehyde, 1,8 cineole, limonene	<i>An. gambiæ</i>
Dianthus	<i>Dianthus caryophyllum</i>	coumarin, eugenol, phenylethyl alcohol, $\beta$ -citronellol, geraniol	<i>Ae. aegypti</i>
Ferronia	<i>Ferronia elephantum</i>	trans-anethole, methyl chavicol	<i>Ae. aegypti</i>
Plectranthus	<i>Plectranthus marrubioides</i>	1,8-cineole, camphor	<i>An. gambiæ</i>
Tarhonanthus	<i>Tarhonanthus camphoratus</i>	$\alpha$ -pinene, camphene, 1,8-cineole, $\alpha$ -fenchyl alcohol	<i>An. gambiæ</i>
Tetradenia	<i>Tetradenia riparia</i>	fenchone	<i>An. gambiæ</i>
Lippia	<i>Lippia javanica</i>	camphor, limonene, terpenol, verbenone	<i>Ae. Aegypti, Aedes albopictus</i>
Lantana	<i>Lantana ukambensis</i>	camphene, camphor	<i>An. gambiæ</i>
Hyptis	<i>Hyptis suaveolens</i>	$\beta$ -pinene, sabinene, 1,8-cineol, $\beta$ -caryophyllene, limonene, $\alpha$ -pinene, and bergamotene	<i>Culex quinquefasciatus, Aedes albopictus</i>
Thymus	<i>Thymus vulgaris</i>	carvacrol, p-cymene, linalool, c-terpenene, and thymol	<i>Anopheles quadrimaculatus, Anopheles albimanus, and Aedes aegypti</i>
Lantana	<i>Lantana camara</i>	caryophyllene, eucalyptol, $\alpha$ -humulene, and gemmacrene	<i>Anopheles gambiæ</i>
Angelica	<i>Angelica sinensis</i>	3-N-butylphthalide, butylidene-phthalide, ligustilide, and di-iso-octyl phthalate	<i>Aedes aegypti</i>
Zingiber	<i>Zingiber nimmanii</i>	myrcene, $\beta$ -caryophyllene, $\alpha$ -humulene, and $\alpha$ -cadinol	<i>Anopheles stephensi, Aedes aegypti, Culex quinquefasciatus</i>
Clausena	<i>Clausena anisata</i>	estragol	<i>Anopheles gambiæ</i>
Lantana	<i>Lantana viburnoides</i>	piperitenone and artemisia ketone	<i>Anopheles gambiæ</i>
Achillea	<i>Achillea vermiculata</i>	(E)-2-hexenal, (E)- $\beta$ -damascenone, geranyl acetone, cis-a-bergamotene and eugenol	<i>Anopheles stephensi</i>
Satoreja	<i>Satoreja hortensis</i>	B-oplophenone, trans-carvone oxide and thymol methyl ether	<i>Anopheles stephensi</i>
Clausena	<i>Clausena dentata</i>	$\alpha$ -clausenan, rosefuran ( $\gamma$ -clausenan) and diclausenans	<i>Aedes aegypti and Culex quinquefasciatus</i>
Uvariodendron	<i>Uvariodendron gorgonis</i>	eugenol	<i>Anopheles gambiæ</i>



**ANNEXE 5** : Plaquettes d'information pour le grand public (113) (114) (115)

J'ÉLIMINE LES EAUX STAGNANTES    JE CHANGE L'EAU 2 FOIS PAR SEMAINE    JE COUVRE LES FÛTS ET CITERNES D'EAU    JE NETTOIE LES GOUTTIÈRES    JE ME PROTÈGE

**COUPEZ L'EAU AUX MOUSTIQUES !**

Chaque femelle moustique tigre pond environ 200 œufs. Au contact de l'eau, ils donnent des larves. C'est là qu'il faut agir.

**PARTOUT, SUPPRIMEZ LES EAUX STAGNANTES !**

Dengue, chikungunya, zika **PROTÉGEONS-NOUS !**

Chaque femelle de « moustique tigre » pond environ 200 œufs. Au contact de l'eau, ils donnent des larves. C'est là qu'il faut agir.

**SOYEZ SECS AVEC LES MOUSTIQUES**

**PARTOUT SUPPRIMEZ LES EAUX STAGNANTES**

**JARDINIÈRES ET POTS DE FLEURS**  
Raisonnez leur arrosage: terreau humide, jamais d'eau apparente.

**VASES, SEAUX, SOUCOUPES SOUS LES POTS DE FLEURS**  
Videz-les souvent (au moins une fois par semaine). Pour les soucoupes, remplacez l'eau par du sable humide.

**RÉSERVES D'EAU (BIDONS, BACS POUR ARROSAGE)**  
Couvrez-les de toile moustiquaire ou autre tissu.

**MATÉRIELS DE JARDIN, JOUETS, TOUTS RÉCEPTACLES POTENTIELS D'EAU**  
Videz-les puis retournez-les ou rentrez-les.

**BASSINS D'AGRÈMENT**  
Entretenez-les régulièrement, introduisez-y des poissons rouges friands de larves.

**GOUTTIÈRES, RIGOLES, REGARDS D'ÉVACUATION**  
Vérifiez le bon écoulement des eaux. Curez-les régulièrement.

**PISCINES**  
Entretenez-les régulièrement, bâchez-les (mais évacuez l'eau retenue par les bâches) ou videz-les.

CONSEIL GÉNÉRAL ALPES-MARTIMES    EID MEDITERRANEE



**PRIVONS-LE D'EAU !**



*Check-list*



**VIDEZ**

1 FOIS/SEMAINE TOUS LES RÉCEPTACLES POUR ÉVITER LES EAUX STAGNANTES

- Coupelles sous les pots de fleurs.
- Pots avec réserve d'eau et trappe sans lit de gravier au fond.
- Gamelles pour animaux domestiques.
- Pieds de parasols.
- Bâches de mobiliers de jardin.
- Bouturages.
- Éléments de décoration pouvant retenir l'eau (nains de jardins, cigales,...).
- Pluviomètres plastiques.



**RANGEZ**

À L'ABRI DE LA PLUIE ET/OU DES IRRIGATIONS

- Outils de jardinage, brouettes.
- Seaux et arrosoirs.
- Poubelles.
- Pneumatiques.
- Jouets.



**JETEZ**

- Boîtes de conserve.
- Déchets de chantier.



**COUVREZ**

DE FAÇON COMPLÈTEMENT HERMÉTIQUE OU À L'AIDE D'UN VOILAGE MOUSTIQUAIRE FIN

- Récupérateurs d'eau de pluie ou cuves.
- Fûts divers.
- Tous réceptacles pluviaux via les chéneaux de la maison.



**CUREZ**

POUR FACILITER LES ÉCOULEMENTS DES EAUX

- Siphons d'éviers, de lave-mains extérieurs, de fontaines.
- Bondes d'évacuation extérieures.
- Rigoles couvertes avec grille.
- Gouttières, chéneaux.



**ENTRETIENEZ**

- Piscines (veiller au bon dosage du chlore car une piscine peu chlorée est un nid à moustiques).
- Pièges à sable.
- Bassins d'agrément (y mettre des poissons rouges).
- Pompes de relevages.
- Regards et bornes d'arrosages.

: Just Happiness - 05/2016



## SERMENT DE GALIEN

Je jure, en présence des maîtres de la Faculté, des conseillers de l'ordre des Pharmaciens et de mes condisciples :

D'honorer ceux qui m'ont instruite dans les préceptes de mon art et de leur témoigner ma reconnaissance en restant fidèle à leur enseignement ;

D'exercer, dans l'intérêt de la santé publique, ma profession avec conscience et de respecter non seulement la législation en vigueur, mais aussi les règles de l'honneur, de la probité et du désintéressement ;

De ne jamais oublier ma responsabilité et mes devoirs envers le malade et sa dignité humaine.

En aucun cas, je ne consentirai à utiliser mes connaissances et mon état pour corrompre les mœurs et favoriser des actes criminels.

Que les hommes m'accordent leur estime si je suis fidèle à mes promesses.

Que je sois couverte d'opprobre et méprisée de mes confrères si j'y manque.

## **Titre : Biodiversité et moustiques face au changement climatique et à la mondialisation**

Impacts sur la santé en France métropolitaine

**Résumé :** Le moustique, bien connu dans son rôle de vecteur de maladies graves voire mortelles, participe également à la biodiversité. Notre travail a pour but de mettre en avant la complexité de la biodiversité et de replacer le rôle des moustiques en son sein. Nous étudions plus en détail l'extension d'une des espèces de moustique, *Aedes albopictus*, dans le contexte du changement climatique et de mondialisation ainsi que les risques sanitaires qui en découlent. Nous abordons ensuite les mesures de prévention individuelles et collectives à appliquer pour lutter contre cet envahisseur. Une dernière partie porte sur une réflexion large concernant la santé humaine face à l'évolution du climat et des échanges mondiaux.

**Mots clés :** biodiversité, moustique tigre, prévention, santé humaine, climat

---

## **Title: Biodiversity and mosquitoes in face of climate change and globalization**

Impacts on health in metropolitan France

**Abstract:** The mosquito, well known for its role as a disease vector causing high mortality in humans, has also other functions within biodiversity. Our work aims to highlight the complexity of biodiversity and to reposition the role of mosquitoes. We study in more detail the spread of one of the mosquito species, *Aedes albopictus*, in the context of climate change and globalization and the resulting health risks. We then discuss the individual and collective prevention measures to be applied to combat this invader. A final section deals with a broad reflection on human health in the face of climate change and global trade.

**Keywords:** biodiversity, tiger mosquito, prevention, human health, climate

---