

2022-2023

Thèse  
pour le  
**Diplôme d'État de Docteur en Pharmacie**

**Rôle du réchauffement climatique et  
des activités humaines dans  
l'émergence du moustique tigre  
(*Aedes albopictus*) en France  
métropolitaine.**

**Rogliano Edouard**

Né le 04/03/1995 à Paris (75)

Sous la direction de M. Larcher Gérald

Membres du jury

Mme APAIRE-MARCHAIS Véronique | Présidente du jury

M. LARCHER Gérald | Directeur de thèse

Mme PECH Brigitte | Membre du jury

Mme DESGRANGES Sylvie | Membre du jury



Soutenue publiquement le :  
29 mars 2023

**FACULTÉ  
DE SANTÉ**  
UNIVERSITÉ D'ANGERS

# ENGAGEMENT DE NON PLAGIAT

Je soussigné, ROGLIANO Edouard déclare être pleinement conscient que le plagiat de documents ou d'une partie d'un document publiée sur toutes formes de support, y compris l'internet, constitue une violation des droits d'auteur ainsi qu'une fraude caractérisée. En conséquence, je m'engage à citer toutes les sources que j'ai utilisées pour écrire ce rapport ou mémoire.

signé par l'étudiant le **28 / 02 / 2023**





## **LISTE DES ENSEIGNANTS DE LA FACULTÉ DE SANTÉ D'ANGERS**

**Doyen de la Faculté** : Pr Nicolas Lerolle

**Vice-Doyen de la Faculté et directeur du département de pharmacie** : Pr Sébastien Faure

**Directeur du département de médecine** : Pr Cédric Annweiler

### PROFESSEURS DES UNIVERSITÉS

ABRAHAM Pierre	PHYSIOLOGIE	Médecine
ANGOULVANT Cécile	MEDECINE GENERALE	Médecine
ANNWEILER Cédric	GERIATRIE ET BIOLOGIE DU VIEILLISSEMENT	Médecine
ASFAR Pierre	REANIMATION	Médecine
AUBE Christophe	RADIOLOGIE ET IMAGERIE MEDICALE	Médecine
AUGUSTO Jean-François	NEPHROLOGIE	Médecine
BAUFRETON Christophe	CHIRURGIE THORACIQUE ET CARDIOVASCULAIRE	Médecine
BELLANGER William	MEDECINE GENERALE	Médecine
BENOIT Jean-Pierre	PHARMACOTECHNIE	Pharmacie
BIERE Loïc	CARDIOLOGIE	Médecine
BIGOT Pierre	UROLOGIE	Médecine
BONNEAU Dominique	GENETIQUE	Médecine
BOUCHARA Jean-Philippe	PARASITOLOGIE ET MYCOLOGIE	Médecine
BOUET Pierre-Emmanuel	GYNÉCOLOGIE-OBSTÉTRIQUE	Médecine
BOUVARD Béatrice	RHUMATOLOGIE	Médecine
BOURSIER Jérôme	GASTROENTEROLOGIE ; HEPATOLOGIE	Médecine
BRIET Marie	PHARMACOLOGIE	Médecine
CALES Paul	GASTROENTEROLOGIE ; HEPATOLOGIE	Médecine
CAMPONE Mario	CANCEROLOGIE ; RADIOTHERAPIE	Médecine
CAROLI-BOSC François-Xavier	GASTROENTEROLOGIE ; HEPATOLOGIE	Médecine
CASSEREAU Julien	NEUROLOGIE	Médecine
CONNAN Laurent	MEDECINE GENERALE	Médecine
COPIN Marie-Christine	ANATOMIE ET CYTOLOGIE PATHOLOGIQUES	Médecine
COUTANT Régis	PEDIATRIE	Médecine
CUSTAUD Marc-Antoine	PHYSIOLOGIE	Médecine
CRAUSTE-MANCIET Sylvie	PHARMACOTECHNIE HOSPITALIERE	Pharmacie
DE CASABIANCA Catherine	MEDECINE GENERALE	Médecine
DESCAMPS Philippe	GYNÉCOLOGIE-OBSTÉTRIQUE	Médecine
D'ESCATHA Alexis	MEDECINE ET SANTE AU TRAVAIL	Médecine
DINOMAIS Mickaël	MEDECINE PHYSIQUE ET DE READAPTATION	Médecine
DUBEE Vincent	MALADIES INFECTIEUSES ET TROPICALES	Médecine
DUCANCELLÉ Alexandra	BACTERIOLOGIE-VIROLOGIE ; HYGIENE HOSPITALIERE	Médecine
DUVAL Olivier	CHIMIE THERAPEUTIQUE	Pharmacie
DUVERGER Philippe	PEDOPSYCHIATRIE	Médecine
EVEILLARD Mathieu	BACTERIOLOGIE-VIROLOGIE	Pharmacie
FAURE Sébastien	PHARMACOLOGIE PHYSIOLOGIE	Pharmacie
FOURNIER Henri-Dominique	ANATOMIE	Médecine
FOUQUET Olivier	CHIRURGIE THORACIQUE ET CARDIOVASCULAIRE	Médecine
FURBER Alain	CARDIOLOGIE	Médecine
GAGNADOUX Frédéric	PNEUMOLOGIE	Médecine
GOHIER Bénédicte	PSYCHIATRIE D'ADULTES	Médecine
GUARDIOLA Philippe	HEMATOLOGIE ; TRANSFUSION	Médecine
GUILET David	CHIMIE ANALYTIQUE	Pharmacie
HAMY Antoine	CHIRURGIE GENERALE	Médecine
HENNI Samir	MEDECINE VASCULAIRE	Médecine
HUNAULT-BERGER Mathilde	HEMATOLOGIE ; TRANSFUSION	Médecine



# FACULTÉ DE SANTÉ

UNIVERSITÉ D'ANGERS

IFRAH Norbert	HEMATOLOGIE ; TRANSFUSION	Médecine
JEANNIN Pascale	IMMUNOLOGIE	Médecine
KEMPF Marie	BACTERIOLOGIE-VIROLOGIE ; HYGIENE HOSPITALIERE	Médecine
KUN-DARBOIS Daniel	CHIRURGIE MAXILLO-FACIALE ET STOMATOLOGIE	Médecine
LACOUEUILLE FRANCK	RADIOPHARMACIE	Pharmacie
LACCOURREYE Laurent	OTO-RHINO-LARYNGOLOGIE	Médecine
LAGARCE Frédéric	BIOPHARMACIE	Pharmacie
LARCHER Gérald	BIOCHIMIE ET BIOLOGIE MOLECULAIRES	Pharmacie
LASOCKI Sigismond	ANESTHESIOLOGIE-REANIMATION	Médecine
LEBDAI Souhil	UROLOGIE	Médecine
LEGENDRE Guillaume	GYNECOLOGIE-OBSTETRIQUE	Médecine
LEGRAND Erick	RHUMATOLOGIE	Médecine
LERMITE Emilie	CHIRURGIE GENERALE	Médecine
LEROLLE Nicolas	REANIMATION	Médecine
LUNEL-FABIANI Françoise	BACTERIOLOGIE-VIROLOGIE ; HYGIENE HOSPITALIERE	Médecine
MARCHAIS Véronique	BACTERIOLOGIE-VIROLOGIE	Pharmacie
MARTIN Ludovic	DERMATO-VENEREOLOGIE	Médecine
MAY-PANLOUP Pascale	BIOLOGIE ET MEDECINE DU DEVELOPPEMENT ET DE LA REPRODUCTION	Médecine
MENEI Philippe	NEUROCHIRURGIE	Médecine
MERCAT Alain	REANIMATION	Médecine
PAPON Nicolas	PARASITOLOGIE ET MYCOLOGIE MEDICALE	Pharmacie
PASSIRANI Catherine	CHIMIE GENERALE	Pharmacie
PELLIER Isabelle	PEDIATRIE	Médecine
PETIT Audrey	MEDECINE ET SANTE AU TRAVAIL	Médecine
PICQUET Jean	CHIRURGIE VASCULAIRE ; MEDECINE VASCULAIRE	Médecine
PODEVIN Guillaume	CHIRURGIE INFANTILE	Médecine
PROCACCIO Vincent	GENETIQUE	Médecine
PRUNIER Delphine	BIOCHIMIE ET BIOLOGIE MOLECULAIRE	Médecine
PRUNIER Fabrice	CARDIOLOGIE	Médecine
RAMOND-ROQUIN Aline	MEDECINE GENERALE	Médecine
REYNIER Pascal	BIOCHIMIE ET BIOLOGIE MOLECULAIRE	Médecine
RICHARD Isabelle	MEDECINE PHYSIQUE ET DE READAPTATION	Médecine
RICHOMME Pascal	PHARMACOGNOSIE	Pharmacie
RODIEN Patrice	ENDOCRINOLOGIE, DIABETE ET MALADIES METABOLIQUES	Médecine
ROQUELAURE Yves	MEDECINE ET SANTE AU TRAVAIL	Médecine
ROUGE-MAILLART Clotilde	MEDECINE LEGALE ET DROIT DE LA SANTE	Médecine
ROUSSEAU Audrey	ANATOMIE ET CYTOLOGIE PATHOLOGIQUES	Médecine
ROUSSEAU Pascal	CHIRURGIE PLASTIQUE, RECONSTRUCTRICE ET ESTHETIQUE	Médecine
ROUSSELET Marie-Christine	ANATOMIE ET CYTOLOGIE PATHOLOGIQUES	Médecine
ROY Pierre-Marie	MEDECINE D'URGENCE	Médecine
SAULNIER Patrick	BIOPHYSIQUE ET BIOSTATISTIQUES	Pharmacie
SERAPHIN Denis	CHIMIE ORGANIQUE	Pharmacie
SCHMIDT Aline	HEMATOLOGIE ; TRANSFUSION	Médecine
TESSIER-CAZENEUVE Christine	MEDECINE GENERALE	Médecine
TRZEPIZUR Wojciech	PNEUMOLOGIE	Médecine
UGO Valérie	HEMATOLOGIE ; TRANSFUSION	Médecine
URBAN Thierry	PNEUMOLOGIE	Médecine
VAN BOGAERT Patrick	PEDIATRIE	Médecine
VENARA Aurélien	CHIRURGIE VISCERALE ET DIGESTIVE	Médecine
VENIER-JULIENNE Marie-Claire	PHARMACOTECHNIE	Pharmacie
VERNY Christophe	NEUROLOGIE	Médecine
WILLOTEAUX Serge	RADIOLOGIE ET IMAGERIE MEDICALE	Médecine



UNIVERSITÉ D'ANGERS

MAÎTRES DE CONFÉRENCES

BAGLIN Isabelle	CHIMIE THERAPEUTIQUE	Pharmacie
BASTIAT Guillaume	BIOPHYSIQUE ET BIOSTATISTIQUES	Pharmacie
BEAUVILLAIN Céline	IMMUNOLOGIE	Médecine
BEGUE Cyril	MEDECINE GENERALE	Médecine
BELIZNA Cristina	MEDECINE INTERNE	Médecine
BELONCLE François	REANIMATION	Médecine
BENOIT Jacqueline	PHARMACOLOGIE	Pharmacie
BESSAGUET Flavien	PHYSIOLOGIE PHARMACOLOGIE	Pharmacie
BLANCHET Odile	HEMATOLOGIE ; TRANSFUSION	Médecine
BOISARD Séverine	CHIMIE ANALYTIQUE	Pharmacie
BRIET Claire	ENDOCRINOLOGIE, DIABETE ET MALADIES METABOLIQUES	Médecine
BRIS Céline	BIOCHIMIE ET BIOLOGIE MOLECULAIRE	Pharmacie
CAPITAIN Olivier	CANCEROLOGIE ; RADIOTHERAPIE	Médecine
CHAO DE LA BARCA Juan-Manuel	BIOCHIMIE ET BIOLOGIE MOLECULAIRE	Médecine
CHEVALIER Sylvie	BIOLOGIE CELLULAIRE	Médecine
CLERE Nicolas	PHARMACOLOGIE / PHYSIOLOGIE	Pharmacie
COLIN Estelle	GENETIQUE	Médecine
DERBRE Séverine	PHARMACOGNOSIE	Pharmacie
DESHAYES Caroline	BACTERIOLOGIE VIROLOGIE	Pharmacie
DOUILLET Delphine	MEDECINE D'URGENCE	Médecine
FERRE Marc	BIOLOGIE MOLECULAIRE	Médecine
FORTRAT Jacques-Olivier	PHYSIOLOGIE	Médecine
GUELFF Jessica	MEDECINE GENERALE	Médecine
HAMEL Jean-François	BIOSTATISTIQUES, INFORMATIQUE MEDICALE	Médicale
HELESBEUX Jean-Jacques	CHIMIE ORGANIQUE	Pharmacie
HERIVAUX Anaïs	BIOTECHNOLOGIE	Pharmacie
HINDRE François	BIOPHYSIQUE	Médecine
JOUSSET-THULLIER Nathalie	MEDECINE LEGALE ET DROIT DE LA SANTE	Médecine
JUDALET-ILLAND Ghislaine	MEDECINE GENERALE	Médecine
KHIATI Salim	BIOCHIMIE ET BIOLOGIE MOLECULAIRE	Médecine
LANDREAU Anne	BOTANIQUE/ MYCOLOGIE	Pharmacie
LEGEAY Samuel	PHARMACOCINETIQUE	Pharmacie
LEMEE Jean-Michel	NEUROCHIRURGIE	Médecine
LE RAY-RICHOMME Anne-Marie	PHARMACOGNOSIE	Pharmacie
LEPELTIER Elise	CHIMIE GENERALE	Pharmacie
LETOURNEL Franck	BIOLOGIE CELLULAIRE	Médecine
LIBOUBAN Hélène	HISTOLOGIE	Médecine
LUQUE PAZ Damien	HEMATOLOGIE BIOLOGIQUE	Médecine
MABILLEAU Guillaume	HISTOLOGIE, EMBRYOLOGIE ET CYTOGENETIQUE	Médecine
MALLET Sabine	CHIMIE ANALYTIQUE	Pharmacie
MAROT Agnès	PARASITOLOGIE ET MYCOLOGIE MEDICALE	Pharmacie
MESLIER Nicole	PHYSIOLOGIE	Médecine
MIOT Charline	IMMUNOLOGIE	Médecine
MOUILLE Jean-Marc	PHILOSOPHIE	Médecine
NAIL BILLAUD Sandrine	IMMUNOLOGIE	Pharmacie
PAILHORIES Hélène	BACTERIOLOGIE-VIROLOGIE	Médecine
PAPON Xavier	ANATOMIE	Médecine
PASCO-PAPON Anne	RADIOLOGIE ET IMAGERIE MEDICALE	Médecine
PECH Brigitte	PHARMACOTECHNIE	Pharmacie
PENCHAUD Anne-Laurence	SOCIOLOGIE	Médecine
PIHET Marc	PARASITOLOGIE ET MYCOLOGIE	Médecine
POIROUX Laurent	SCIENCES INFIRMIERES	Médecine
PY Thibaut	MEDECINE GENERALE	Médecine
RINEAU Emmanuel	ANESTHESIOLOGIE REANIMATION	Médecine



# FACULTÉ DE SANTÉ

UNIVERSITÉ D'ANGERS

RIOU Jérémie	BIOSTATISTIQUES	Pharmacie
RIQUIN Elise	PEDOPSYCHIATRIE ; ADDICTOLOGIE	Médecine
RONY Louis	CHIRURGIE ORTHOPEDIQUE ET TRAUMATOLOGIQUE	Médecine
ROGER Emilie	PHARMACOTECHNIE	Pharmacie
SAVARY Camille	PHARMACOLOGIE-TOXICOLOGIE	Pharmacie
SCHMITT Françoise	CHIRURGIE INFANTILE	Médecine
SCHINKOWITZ Andréas	PHARMACOGNOSIE	Pharmacie
SPIESSER-ROBELET Laurence	PHARMACIE CLINIQUE ET EDUCATION THERAPEUTIQUE	Pharmacie
TEXIER-LEGENDRE Gaëlle	MEDECINE GENERALE	Médecine
VIAULT Guillaume	CHIMIE ORGANIQUE	Pharmacie

## AUTRES ENSEIGNANTS

ATER		
<b>ELHAJ MAHMOUD Dorra</b>	IMMUNOLOGIE	Pharmacie
<b>PRCE</b>		
AUTRET Erwan	ANGLAIS	Santé
BARBEROUSSE Michel	INFORMATIQUE	Santé
FISBACH Martine	ANGLAIS	Santé
O'SULLIVAN Kayleigh	ANGLAIS	Santé
RIVEAU Hélène	ANGLAIS	
<b>PAST</b>		
CAVAILLON Pascal	PHARMACIE INDUSTRIELLE	Pharmacie
DILÉ Nathalie	OFFICINE	Pharmacie
GUILLET Anne-Françoise	PHARMACIE DEUST PREPARATEUR	Pharmacie
MOAL Frédéric	PHARMACIE CLINIQUE	Pharmacie
PAPIN-PUREN Claire	OFFICINE	Pharmacie
KAASSIS Mehdi	GASTRO-ENTEROLOGIE	Médecine
GUITTON Christophe	MEDECINE INTENSIVE-REANIMATION	Médecine
SAVARY Dominique	MEDECINE D'URGENCE	Médecine
POMMIER Pascal	CANCEROLOGIE-RADIOTHERAPIE	Médecine
PICCOLI Giorgia	NEPHROLOGIE	Médecine
<b>PLP</b>		
CHIKH Yamina	ECONOMIE-GESTION	Médecine

# REMERCIEMENTS

A mon directeur de thèse,  
Monsieur Gérald Larcher, de m'avoir accompagné tout au long de l'écriture de cette thèse. Depuis ma première année en PACES, j'ai toujours eu beaucoup d'estime pour votre soif de connaissances et pour le plaisir que vous avez à transmettre. C'est donc une belle manière pour moi de terminer mes études avec vous.

A ma présidente de thèse et aux membres du jury,  
Madame Véronique Apare-Marchais, de m'avoir aidé à l'écriture de cette thèse et d'avoir accepté de présider ce jury. C'est grâce à vous que je me suis intéressé à ce sujet passionnant. Madame Brigitte Pech, d'avoir accepté d'être membre du jury et en particulier pour votre accompagnement lors de mon changement de filière. Madame Sylvie Desgranges, d'avoir accepté d'être membre du jury et pour votre engagement associatif inspirant.

A la pharmacie Allonneau,  
C'est vous qui avait fait de moi le pharmacien que je suis aujourd'hui. Merci Jocelyn de m'avoir fait confiance et d'avoir mis autant de soin à me former.

A ma famille,  
Mes Grands-Parents et en particulier pour mon Grand-Père Michel Rogliano dont la curiosité intellectuelle a été une lumière tout au long de mes études. Cette thèse est pour toi Grand-Père. Mes parents, vous m'avez toujours encouragé et soutenu dans mes études et si j'ai la chance d'exercer aujourd'hui un métier qui me passionne et me rend heureux c'est grâce à vous. Ma fratrie, Charles et Solène, pour nos souvenirs, nos différences et notre amour qui sont et seront des liens éternels qui nous unissent. Ma belle-famille, merci pour l'intérêt que vous portez à cette thèse et en particulier à Christelle pour ton travail de relecture.

Ma Lucille,  
Depuis 10 ans tu m'accompagnes, me conseilles, m'écoutes et m'encourages chaque jour. Tu m'as beaucoup aidé à la rédaction de la thèse et je n'aurai pas pu le faire sans toi. Merci pour la femme et la mère que tu es. Mon Joseph, Merci pour tes nombreuses visites joyeuses et intempestives qui m'ont motivé à finir cette thèse rapidement pour profiter plus de toi.

A mes Amis,  
Antonin, Anatole, François G., Gaël, Thibault, François M., Simon, Olivier et Victor, mes collègues biochimistes. Paul, Marie G., Mathilde, Aurélien, Marie D., Thibaud, Sophie, Coline, Elise, Jérôme, Léa, Thomas, Aubin, Maurine, Jean-Baptiste, Jacquelín, Myriam, Benoît et Julie, mes amis de la team « Mongazon ». Eloïse, Côme et Annelyse mes amis d'ailleurs.

Merci d'avoir fait de ces années les plus belles de ma vie. Merci pour votre écoute, votre fidélité, votre disponibilité, votre aide et surtout merci pour votre patience (mention spéciale à Antonin et Eloïse). Vous êtes la famille que j'ai choisie et un des cadeaux les plus précieux que j'ai reçu. Ma plus grande qualité est d'avoir su m'entourer de vous tous.

Merci à tous ceux qui m'ont accompagné à un moment de ma vie et qui ont participé à faire de moi l'homme et le professionnel de santé que je suis.

## PLAN

<b>Introduction .....</b>	<b>1</b>
<b>PARTIE 1 : Les variations climatiques .....</b>	<b>2</b>
1.    Définition des climats.....	2
1.1.    Introduction générale .....	2
1.2.    Les facteurs déterminant le climat .....	7
2.    Le réchauffement climatique.....	19
2.1.    Introduction .....	19
2.2.    Les éléments scientifiques .....	20
2.3.    Les causes du réchauffement climatique.....	24
2.4.    Les projections du GIEC.....	33
3.    France métropolitaine .....	40
3.1.    Climat .....	40
3.2.    Les variations climatiques .....	41
<b>PARTIE 2 : Le moustique tigre (<i>Aedes albopictus</i>), vecteur d'arboviroses .....</b>	<b>47</b>
1.    Le vecteur .....	47
1.1.    Position dans la classification phylogénétique.....	47
1.2.    Caractéristiques physiques et biologiques <i>d'Aedes albopictus</i> .....	49
1.3.    Cycle de développement.....	56
1.4.    Place dans la chaîne alimentaire.....	60
1.5.    Compétence, capacité vectorielle et écologie du vecteur .....	61
2.    Les arboviroses transmises : Dengue, chikungunya et Zika.....	63
2.1.    Introduction : Les arboviroses.....	63
2.2.    Transmission d'une arbovirose .....	65
2.3.    Dengue .....	68
2.4.    Chikungunya.....	71
2.5.    Zika .....	74
2.6.    Prévention et lutte antivectorielle .....	76
<b>PARTIE 3 : Facteurs favorisant l'émergence du moustique tigre en France métropolitaine .....</b>	<b>83</b>
1.    Rôles des activités humaines sur l'endémisation <i>d'Aedes albopictus</i> sur de nouveaux territoires .....	83
1.1.    Des activités humaines support de la migration <i>d'Aedes albopictus</i> .....	83
1.2.    Anthropisation des milieux .....	90
2.    Rôle du changement climatique sur l'endémisation <i>d'Aedes albopictus</i> et le développement d'arboviroses	98
2.1.    Changement climatique et maladies infectieuses .....	98
2.2.    Changement climatique, <i>Aedes albopictus</i> et arboviroses .....	100

2.3. Projection sur le changement climatique et la présence du moustique tigre .....	106
<b>3. Arboviroses émergentes en France métropolitaine .....</b>	<b>108</b>
<b>Conclusion.....</b>	<b>110</b>
<b>Bibliographie.....</b>	<b>111</b>
<b>Table des matières .....</b>	<b>123</b>
<b>Table des illustrations .....</b>	<b>127</b>
<b>Table des tableaux .....</b>	<b>130</b>
<b>Annexe.....</b>	<b>131</b>

## Liste des abréviations

ADEGE	Agence Nationale pour la Démoustication et la Gestion des Espaces Naturels Démoustiqués
AINS	Anti-Inflammatoire Non-Stéroïdien
AR	Rapport d'évaluation (Assessment Report)
ARS	Agence Régionale de Santé
BRGM	Bureau de Recherches Géologiques de Minières
Bti	<i>Bacillus thuringiensis israelensis</i>
CaV	Capacité Vectorielle
CEREMA	Centre d'Etudes et d'Expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement
CH <sub>4</sub>	Méthane
CHIKV	Virus du Chikungunya
CO	Monoxyde de carbone
CO <sub>2</sub>	Dioxyde de carbone
COV	Composés organiques volatiles
DEET	N,N-diéthyl-m-toluamide
DENV	Virus de la Dengue
DGS	Direction Générale de la Santé
EID	Entente Interdépartementale de Démoustifications
ELISA	Technique de dosage d'immunoabsorption par Enzyme liée (Enzyme-Linked Immuno Assay)
ENSO	Oscillation Australe El Nino (El Nino Southern Oscillation)
ERF	Forçage Radiatif Effectif (Effective Radiative Forcing)
GES	Gaz à Effet de Serre
GIEC	Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
GWP	Global Warning Potential
HFC	Hydrofluorure de souffre
IFM	Indice Forêt Météo
Ig	Immunoglobuline
INPES	Institut National d'Education et de Prévention pour la Santé
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IRD	Institut de Recherche pour le Développement
LAV	Lutte Anti-Vectorielle
N <sub>2</sub> O	Oxyde nitreux
NADW	North Atlantic Deep Water
NAO	Oscillation Nord-Atlantique (North Atlantic Oscillation)
NF <sub>3</sub>	Trifluorure d'azote
NO <sub>x</sub>	Oxydes d'azote réactifs
O <sub>3</sub>	Ozone
OMS	Organisation Mondiale de la Santé
ONERC	Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique
ORSEC	Organisation de la Réponse de Sécurité Civile
PFC	Perfluorure de souffre
PMD	p-menthane-3,8-diol
PPAV	Protection Personnelle Anti-Vectorielle
PRG	Pouvoir de Réchauffement Global

RCP	Profils représentatifs d'évolution de concentration (Representative Concentration Pathways)
RT-PCR	Reverse Transcriptase Chain Polymerase Reaction
SF <sub>6</sub>	Hexafluorure de souffre
SO <sub>2</sub>	Dioxyde de souffre
SSP	Shared Socioeconomic Pathways
ZIKV	Virus du Zika

## Introduction

Depuis l'apparition de la vie sur Terre, chaque être vivant vit dans un environnement auquel il s'adapte pour survivre. Celui-ci lui apporte les ressources ainsi que les conditions biophysiques nécessaires au déroulement de ses biomécanismes. L'être humain répond aux mêmes besoins et a su par son intelligence développer des technologies lui permettant de faciliter sa survie. Cet essor technologique a conduit à l'apparition de nouvelles activités dépendantes de l'usage des énergies fossiles. Leur combustion responsable d'importantes émissions de gaz à effet de serre a entraîné en un siècle un changement climatique se déroulant normalement sur plusieurs dizaines de millénaire (1).

Parallèlement à ces bouleversements, le moustique tigre (*Aedes albopictus*) ne cesse d'étendre son territoire pour être aujourd'hui sur 5 continents. Son implantation en France en 2004 était les prémisses de son expansion sur 67 des 96 départements que compte la France en 2022 (2). Le moustique tigre est un arthropode vecteur de pathologies parmi lesquelles on retrouve le Zika, la dengue et le chikungunya. Les risques épidémiques qu'entraîne son implantation en France font de l'extension du moustique tigre une question de santé publique majeure.

Comprendre les relations de cause à effet entre les activités humaines, le changement climatique et l'expansion du moustique tigre en France métropolitaine constitue un prérequis à la mise en place de campagnes de prévention et de lutte antivectorielle. Cette thèse s'inscrit dans cette démarche en abordant dans un premier temps les facteurs déterminant le climat et les changements climatiques en cours et à venir. Dans une deuxième partie, nous développerons les caractéristiques physiques et biologiques du moustique *Aedes albopictus* ainsi que les arboviroses transmises par ce vecteur. Pour finir, nous mettrons en relation l'effet du changement climatique et des activités humaines sur l'implantation d'*Aedes albopictus* en France métropolitaine.

# PARTIE 1 : Les variations climatiques

## 1. Définition des climats

### 1.1. Introduction générale

Le mot climat vient du verbe grec « *klinein* » signifiant « pencher, incliner, coucher, étendre » et du mot « *Klinicos* » nommant ce qui est « relatif au lit ». Du grec découlera le latin « *clincus* » puis le français « clinique » faisant référence à la place du médecin au chevet de son patient. C'est aux environs de 350 avant J.C. que l'astronome Grecque Euxode de Cnide emploi le terme de « *Klima* » pour définir le principe de latitude, c'est-à-dire « l'inclinaison de l'horizontal d'un lieu par rapport à l'axe des pôles ». C'est ainsi que le mot « *Klima* » a été employé pour définir une zone géographique à une latitude donnée (3). Le mot climat apparaît au 13ème siècle pour définir une zone géographique climatique et prendra son sens moderne au 18<sup>ème</sup> siècle pour définir selon l'organisation météorologique mondiale, « la synthèse des conditions météorologiques dans une région donnée sur une période donnée ».

La définition d'un climat va dépendre de l'échelle à laquelle on le regarde. C'est ainsi qu'à l'échelle planétaire on s'intéresse aux climats zonaux, c'est-à-dire aux 5 grandes zones : tropicale, aride, subtropicale, continentale et polaire. Elles vont être essentiellement définies par leur latitude qui en fonction de l'incidence des rayons du soleil vont recevoir une énergie solaire maximale au niveau tropical et minimale au niveau polaire.

En affinant notre regard et en nous concentrant sur des zones plus réduites, ce sont les climats dits régionaux qui apparaissent. On en dénombre 10 types (4). L'Antarctique non représenté sur la figure 1 est sous influence climatique polaire. Ces climats s'étendant sur des centaines de milliers de mètres carrés vont être définis par le bilan radiatif solaire annuel mais aussi par les courants atmosphériques s'y déroulant et par la géographie du lieu ayant un impact sur la pluviométrie, les températures, les vents, etc. Cette échelle reste la plus adaptée pour comprendre la répartition des climats au niveau planétaire.

A l'échelle d'un pays, nous pourrons nous intéresser aux climats dit locaux. Ceux-ci vont directement dépendre en plus des facteurs régionaux vu précédemment, des facteurs topographiques : urbanisé ou non, sur le littoral ou en montagne, etc. C'est l'échelle qui nous intéressera pour comprendre l'avancée du moustique tigre en France et l'impact du climat sur son expansion territoriale.

Il faut également tenir compte des microclimats que l'on retrouve dans des zones ne dépassant pas quelques mètres carrés. Pour illustrer ce phénomène, on a constaté dans la ville de San Francisco qu'en passant d'un quartier à un autre, la température pouvait varier jusqu'à 5°C principalement en fonction de sa position par rapport à la mer et de la taille des immeubles qui laissent passer plus ou moins bien le soleil (5).

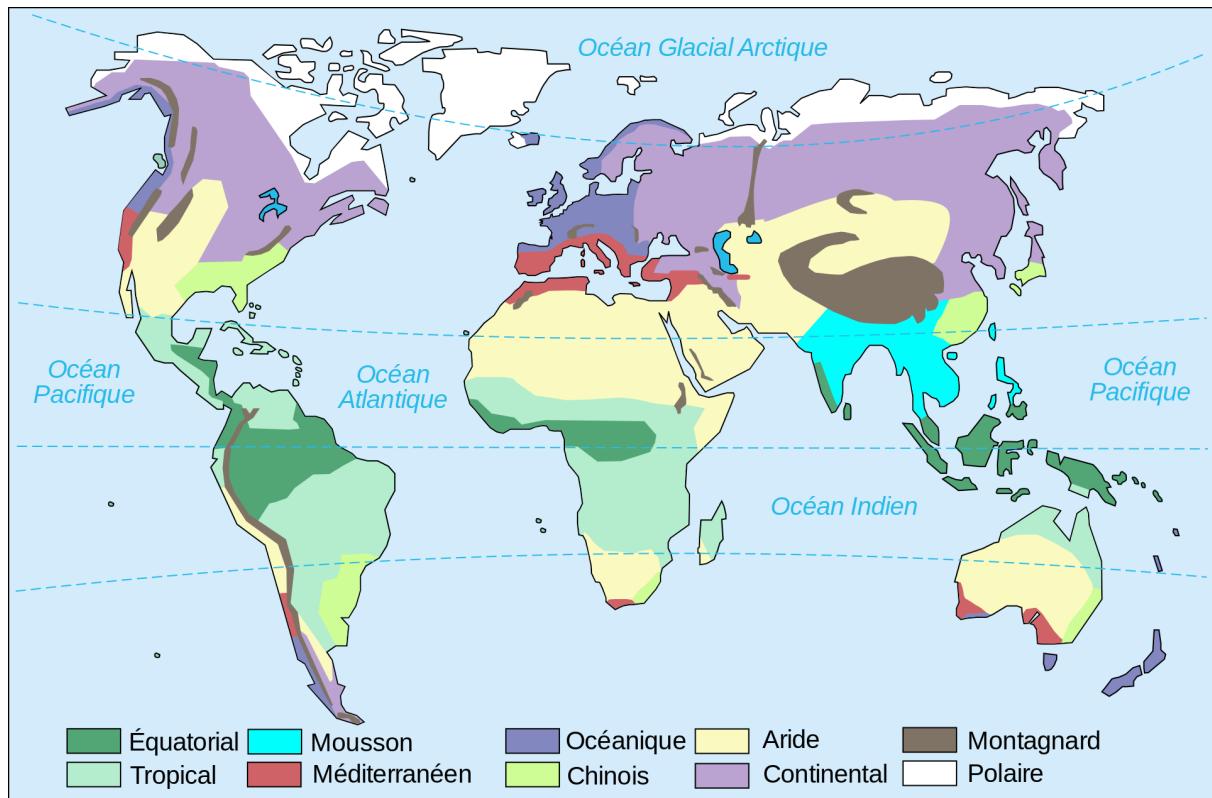


Figure 1 : Cartographie des climats (4)

### 1.1.1. Le climat polaire

Le climat polaire est caractérisé par des hivers longs et froids et des étés frais et courts. Les températures sont une grande partie de l'année inférieures à 0°C. On retrouve ainsi en Antarctique une température annuelle moyenne de – 10°C sur les côtes. Ces températures peuvent descendre à -60°C dans les terres dès que l'on prend de l'altitude. Ces températures maintiennent toute l'année le sol gelé sur plusieurs mètres de profondeur. Les zones polaires alternent les périodes d'accalmies assurées par des conditions anticycloniques avec des périodes de forts vents que l'on appelle blizzard ou purga, qui surviennent lors du passage d'une dépression. Les précipitations y sont faibles sauf à proximité des côtes. On retrouve le climat polaire au-delà du 70<sup>ème</sup> parallèle au nord et au sud de l'hémisphère. On le retrouve ainsi en Antarctique, en Alaska, au nord de la Sibérie, au Groenland et en Arctique.

### **1.1.2. Le climat tempéré**

Le climat tempéré concerne les régions situées entre les 40<sup>ème</sup> et 60-70<sup>ème</sup> parallèles. Il regroupe une grande diversité de sous-types.

#### **a) Le climat continental**

Le climat continental concerne les régions situées dans l'hémisphère nord à des latitudes comprises entre les 45 et 65<sup>èmes</sup> parallèles. Les hivers y sont longs, froids et secs avec des températures moyennes hivernales négatives. Plus on entre dans les terres, plus l'influence océanique diminue. On retrouve ainsi un climat dit « hypercontinental » dans certaines régions d'Alaska et de Sibérie où les températures vont y être encore plus glaciales l'hiver. Le printemps est court car les températures ne remontent qu'au mois d'avril pour atteindre durant l'été des températures moyennes autour de 20°C. Ces températures chaudes estivales vont entraîner la fonte des neiges et l'évaporation des eaux de surface rendant la saison estivale pluvieuse et humide. Puis au début de l'automne, saison également courte sous ce climat, le manteau neigeux se reforme pour se maintenir durant l'hiver. Le climat continental se caractérise par de forts écarts de températures entre les saisons. Au sein du climat continental, on retrouve de nombreuses variations selon la topologie des lieux.

#### **b) Le climat océanique**

Le climat océanique se retrouve dans les zones géographiques proches des océans. Il se caractérise par des températures douces et une pluviométrie importante, conséquence des vents ramenant vers les côtes les masses d'air chargées en humidité sous forme de précipitations. De nombreuses variantes existent et seront en partie abordées lors de l'étude du climat français.

### **1.1.3. Le climat méditerranéen**

Le climat méditerranéen se caractérise par des hivers doux et pluvieux, des étés chauds et secs. L'ensoleillement y est important toute l'année et les précipitations sont de forte intensité et souvent accompagnées de forts vents et d'orages.

#### **1.1.4. Le climat chinois**

Le climat chinois est caractérisé par de fortes précipitations et un air très humide tout au long de l'année. Les étés y sont chauds tandis que les hivers sont doux. Il arrive cependant que des vents polaires balayent ces régions pouvant faire brutalement chuter la température en-dessous de 0°C. Comme son nom l'indique on retrouve ce climat en Chine mais également au sud-est des Etats-Unis, en Amérique du sud, en Corée et au Japon.

#### **1.1.5. Le climat équatorial**

Le climat équatorial n'est composé que d'une seule saison. Les températures y sont chaudes et sont la plupart de l'année comprises entre 25 et 28°C. Elles sont associées à une humidité importante entre 70 et 90 % qui perdure toute l'année. Les précipitations y sont très fréquentes avec 200 jours de pluie par an, souvent à de forte intensité. Elles atteignent 1500 à 2500 mm/an et peuvent être beaucoup plus importantes dans certaines régions (6). Comme son nom l'indique on retrouve ce climat au niveau de l'équateur c'est-à-dire en Amazonie, au Congo, en Indonésie, etc.

#### **1.1.6. Le climat tropical**

Le climat tropical se caractérise par l'alternance de 2 saisons : sèche en hiver et humide en été. C'est un climat qui se situe à mi-chemin entre le climat aride et équatorial. Il n'y a pas de période particulièrement froide. En effet, la moyenne du mois le plus froid ne descend pas en-dessous de 15°C. On retrouvera donc une faible amplitude de variations de température entre les saisons. Ce climat se retrouve entre les 10 et 20<sup>èmes</sup> parallèles c'est-à-dire la zone des tropiques.

#### **1.1.7. La mousson**

La mousson est un phénomène climatique se déroulant au niveau des tropiques. On pourrait le décrire comme une sous-classe des climats tropicaux mais de par l'importance de la zone géographique couverte, elle mérite d'être détaillée. Les étés sont très chauds et très humides. Les précipitations peuvent atteindre jusqu'à 10 000 mm annuellement dans les régions les plus arrosées. Les hivers quant à eux, vont être frais et secs. Les pluies s'y feront rare. On retrouve le climat de mousson en Inde par exemple.

### **1.1.8. Le climat montagnard**

Le climat montagnard va être directement lié à l'altitude. Plus on est haut et plus les températures seront faibles ; on perd entre 0,5 et 1°C tous les 100 mètres de dénivelé positif. En même temps que l'altitude augmente, la pluviométrie et l'épaisseur de neige en hiver augmentent jusqu'à une certaine hauteur à partir de laquelle la pluviométrie va en diminuant. Les vallées en contre-bas vont lors de conditions anticycloniques accumuler l'air frais tandis que l'air chaud va remonter sur les versants. Dans le climat montagnard, d'un versant à l'autre, les conditions climatiques changent et touchent la pluviométrie, l'ensoleillement et la température.

### **1.1.9. Le climat aride**

Le climat aride est essentiellement défini par une faible pluviométrie (inférieure à 450 mm/an) et des températures très chaudes l'été. On retrouve 2 types de climats arides : chaud et froid. Le climat aride chaud présente des hivers doux tandis que le froid est caractérisé par des hivers dont les températures sont en moyenne négatives plusieurs mois par an.

## 1.2. Les facteurs déterminant le climat

### 1.2.1. Le soleil

#### a) Description

Le soleil est une étoile située à 150 millions de kilomètres de la Terre faisant d'elle la plus proche de notre planète (7). Une étoile est une masse lumineuse composée de plasma agrégé et maintenu sous forme d'une sphère par sa propre force de gravité. C'est cette force de gravité qui va permettre de réunir les conditions physico-chimiques en son cœur pour déclencher des réactions thermonucléaires à l'origine de l'émission d'énergie sous la forme de rayons lumineux. Une étoile reste lumineuse tant qu'elle possède suffisamment de matière première. Une fois celle-ci totalement consommée, les étoiles dites « ordinaires », à différencier des étoiles massives, se densifient jusqu'à ce qu'il ne reste plus que le noyau, elles deviennent alors « naine blanche ». Une fois le noyau totalement refroidi, elles passent au dernier stade appelé « naine noire ». Ce qui permet de différencier l'étoile d'une planète, c'est que l'étoile est une source de lumière tandis que les planètes ne font que refléter celle-ci.

La formation du soleil remonte à plus de 4,6 milliards d'années, il a de quoi émettre des rayonnements lumineux jusqu'à 10 milliards d'années (7). Le rayonnement solaire est la source d'énergie quasi-unique de la Terre. Il représente plus de 99% de l'énergie reçue tandis que l'énergie géothermique, c'est-à-dire produite par la Terre, ne représenterait que 0,01% de l'énergie totale. L'énergie solaire captée sur un espace donné est un facteur primordial pour comprendre les différences de climats à l'échelle du globe. Celle-ci va varier selon deux facteurs : spatial et temporel.

#### b) Les variations de l'énergie solaire à la surface de la Terre

##### Les variations spatiales

En fonction des latitudes de la Terre, le rayonnement solaire va varier. On retrouve ainsi une forte valeur au niveau de l'équateur (latitude 0) et plus on s'éloigne de cette latitude, plus le rayonnement capté diminue (fig.2).

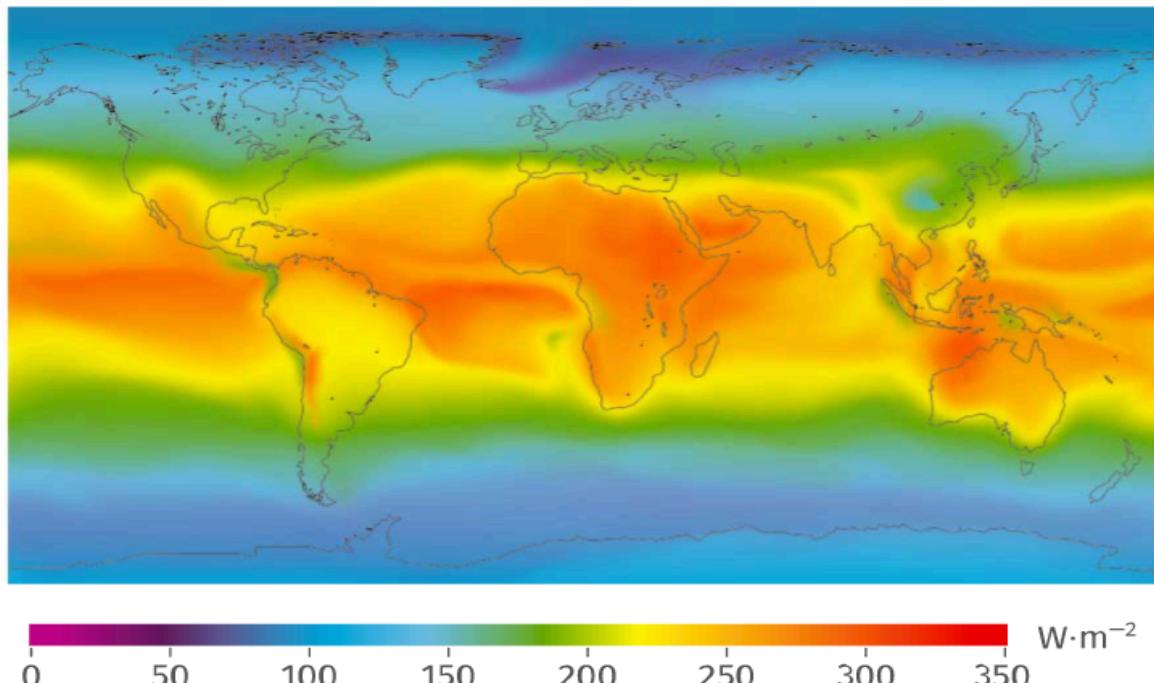


Figure 2 : Puissance surfacique moyenne de l'irradiation solaire reçue en une année sur une surface donnée de la Terre (8)

Comme le montre la figure 3, ce phénomène est dû à la forme sphérique de la Terre. Pour mieux comprendre ce phénomène, nous pouvons concevoir les rayonnements lumineux comme une succession de disque qui arriveraient sur la Terre. Au niveau de l'équateur, la courbure de la Terre est très légère, le rayonnement incident occupe une surface minimale. L'énergie est donc concentrée sur une surface réduite. Au contraire au niveau des pôles, la courbure de la Terre est à son maximum. Le rayonnement incident va se répartir sur une très grande surface. L'énergie est donc moins concentrée qu'au niveau de l'équateur.

En fait, pour un rayonnement incident de même énergie, plus la surface de contact avec la Terre augmente, plus la puissance surfacique diminue.

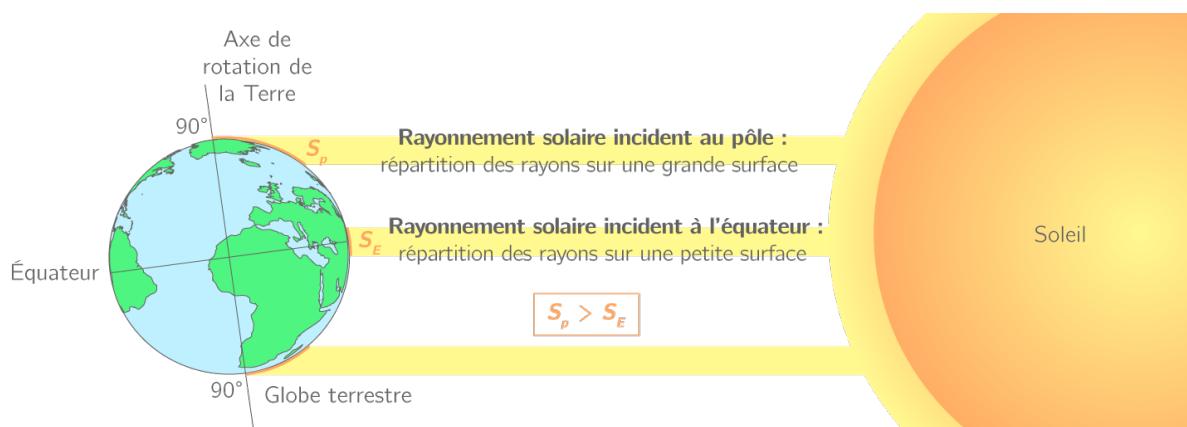


Figure 3 : Variations surfaciques de l'énergie solaire captée à la surface de la Terre en fonction de la latitude (9)

## Les variations temporelles

Les variations temporelles vont être à l'origine des différentes saisons. Ce qui explique ce phénomène est l'axe de la Terre qui lors de sa rotation autour du soleil va rester le même (fig.4). Ainsi en été dans l'hémisphère nord, l'angle d'incidence du soleil va être faible et les rayons lumineux vont être plus concentré, il va faire plus chaud. Durant cette même période l'angle d'incidence pour l'hémisphère sud sera important, les rayons du soleil seront moins concentrés, il fera donc moins chaud. Une fois que la terre aura effectué la moitié de son parcours autour du soleil, les saisons seront inversées.

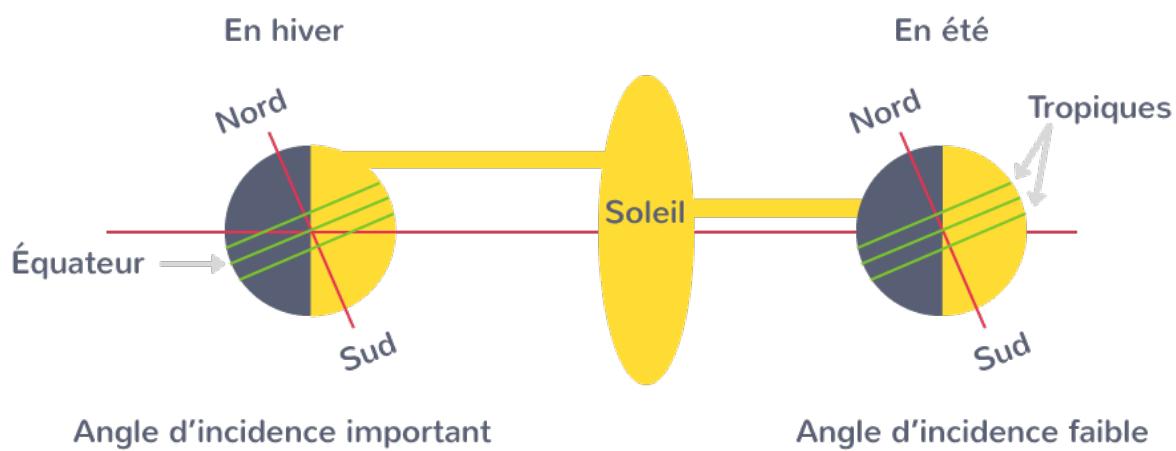


Figure 4 : Variations saisonnières de l'énergie solaire captée à la surface de la Terre (10)

### 1.2.2. L'eau

#### a) Le cycle de l'eau

L'eau est une molécule recouvrant 72% de la Terre et représente en volume 1400 millions de km<sup>3</sup>. Ce volume reste constant dans le temps et se décompose en 2 parties : l'eau salée représentant environ 97% du total aquifère et le reste est constitué d'eau douce (11). L'eau sur Terre peut exister sous 3 états : solide (glace, neige, etc.), liquide (océans, rivières, eaux souterraines, etc.) et gazeux (atmosphère). Ces états vont se succéder en fonction des conditions physico-chimiques de l'environnement dans lequel l'eau se trouve. C'est l'alternance de ces états qui va être à l'origine de la formation du cycle de l'eau (fig.5).

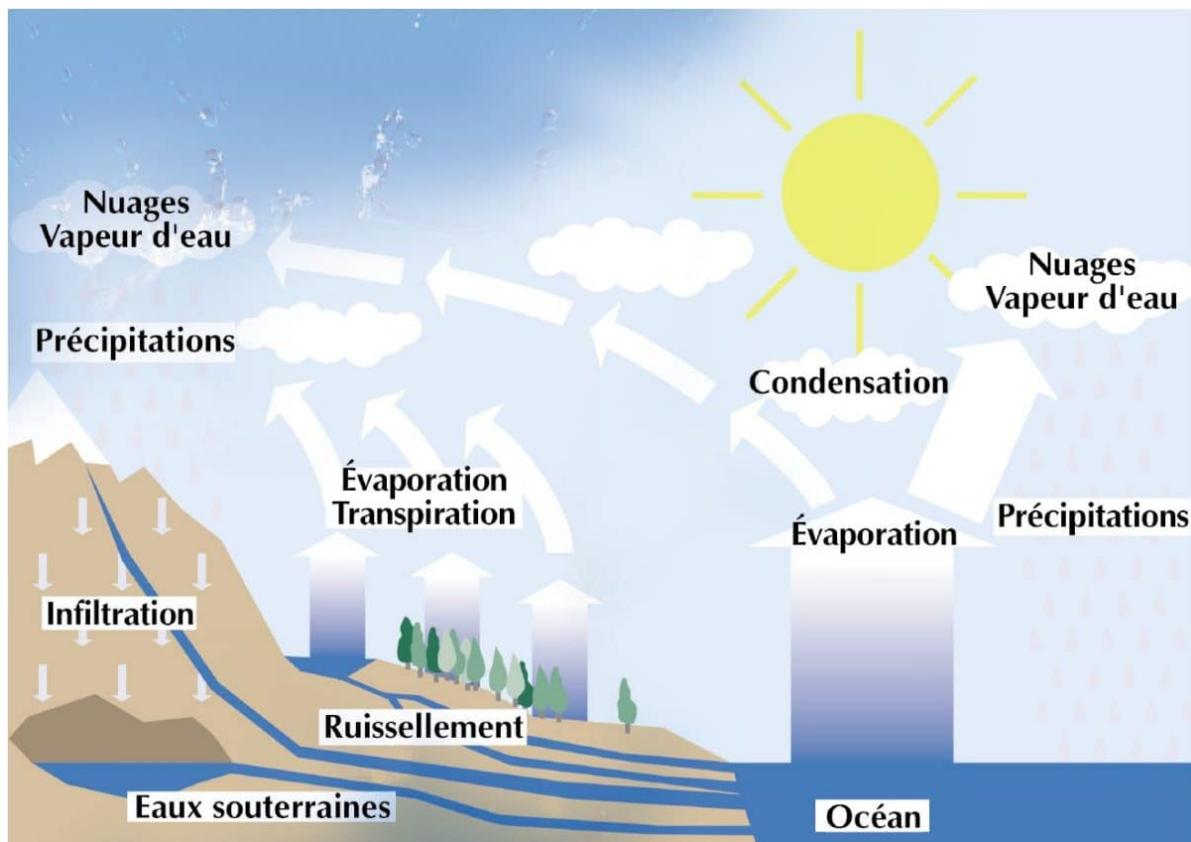


Figure 5 : Cycle de l'eau (12)

Si par définition le cycle de l'eau n'a pas de début nous allons commencer par considérer l'étape de l'évaporation. Grâce à l'énergie fournie par les rayons lumineux du soleil, l'eau va passer de l'état liquide à l'état gazeux ce que l'on appelle l'évaporation. Ainsi l'eau présente à la surface des océans et des mers va rejoindre l'atmosphère sous forme gazeuse. L'évaporation va également se produire au niveau de la terre ce que l'on appelle l'évapotranspiration. Ce phénomène est issu de l'eau des animaux, végétaux, humains, des rivières, des sols, et des autres réserves présentes sur Terre. Une fois évaporée, l'eau rejoint les hauteurs de l'atmosphère grâce à des courants d'air ascendants. Au fur et à mesure qu'elle prend de la hauteur, son environnement se refroidit jusqu'à entraîner son passage de l'état gazeux à liquide, ce que l'on appelle la condensation. L'agglomération de ces fines particules d'eau va former les nuages. Les courants d'air déplacent les nuages qui vont sous l'effet des changements climatiques et de la gravité perdre leur eau sous forme de précipitations. Ces dernières vont retomber à 79% dans les océans. Les 21% restant chutent sur Terre et vont soit ruisseler en surface, soit s'infiltrer en profondeur dans le sol jusqu'à rejoindre des eaux souterraines (12). Sous certaines températures les précipitations vont tomber sous forme de neige et s'agglomérer pour former des glaciers. A l'été ces glaciers fondront en partie pour former des cours d'eau en surface qui eux-mêmes ruisselleront jusqu'à rejoindre de plus

grands cours d'eau qui iront à leur tour dans les océans ou les mers où un nouveau cycle pourra recommencer (13).

Lors du cycle de l'eau, des transferts d'énergie importants ont lieu. Lors de l'évaporation de l'eau, les réserves d'eau vont se réchauffer en prenant de l'énergie à l'atmosphère qui va donc se refroidir. A contrario, lors de la condensation de la vapeur d'eau en fines gouttelettes, cette énergie va être restituée à l'atmosphère. Ces changements d'état de l'eau vont être responsables de variations de température, d'humidité ainsi que de la formation de courants d'airs chauds et froids, autant de facteurs permettant de définir un climat.

### **b) Le niveau des océans**

Le niveau des océans et des mers varie sur Terre en fonction de différents facteurs qui vont être, soit éphémères et répétés comme les marées dues à la force d'attraction de la lune, soit durables et lents comme la sédimentation au fond des océans par exemple. A ces facteurs naturels s'ajoutent deux principaux facteurs directement liés aux variations climatiques (14) :

- Le réchauffement des océans qui par dilatation des masses d'eau entraîne une augmentation du volume et donc de la hauteur des océans.
- La fonte des glaces qui est responsable d'une augmentation du volume d'eau liquide et donc du niveau des océans et des mers.

#### **1.2.3. La circulation atmosphérique : les vents**

Au niveau de l'équateur, la chaleur y est en moyenne plus importante que sur le reste du globe. Cette chaleur entraîne le réchauffement de l'air qui va se dilater, être plus léger et qui va s'élever dans l'atmosphère formant ainsi un courant d'air ascendant. Une fois arrivé à 10-12 km de hauteur, le froid stoppe son ascension et l'air chaud en-dessous va pousser ces masses d'air vers les latitudes 30° nord et sud où elles vont redescendre en surface avant de rejoindre l'équateur par appel d'air. On appelle ce circuit la cellule de Hadley du nom du physicien l'ayant découvert (15). Sur le même principe, au niveau des pôles, les températures y étant particulièrement froides, l'air en hauteur va être particulièrement dense et va descendre vers la surface de la Terre. Pressé par la colonne d'air descendante, l'air en surface va se déplacer vers les latitudes 50-60° nord et sud où il se réchauffera, prendra de la hauteur et sous la pression de la colonne d'air ascendante retournera vers les pôles pour former une

boucle que l'on appelle la cellule polaire. Sous l'influence des deux cellules précédentes se forme la cellule de Ferrel qui a pour particularité de tourner en sens inverse. Cette différence s'explique par le fait que contrairement aux cellules polaire et de Hadley, elle n'est pas influencée par la température mais par l'activité environnante des cellules polaires et de Hadley. On la retrouve au niveau des latitudes 50-60° et 30° (15,16).

L'ensemble de cette circulation atmosphérique permet une répartition de la chaleur à la surface du globe limitant un réchauffement excessif des zones équatoriales ou un refroidissement extrême des zones polaires. Cependant ces cellules n'expliquent pas à elles seules les mouvements d'air à la surface du globe. En effet, un autre facteur primordial entre en ligne de compte : La rotation de la Terre sur elle-même responsable de l'effet de Coriolis.

La Terre effectue une rotation sur elle-même en 24 heures. Ainsi n'importe quel point du globe fait un tour complet en 24h. Pour effectuer ce tour complet, un point situé au niveau de l'équateur devra parcourir une distance beaucoup plus grande qu'un point du globe situé en zone polaire qui va donc tourner plus vite. Ainsi le courant chaud de la cellule de Hadley allant de la latitude 30° nord ou sud vers l'équateur sera dévié vers l'est tandis que le courant chaud de la cellule de Ferrel allant de 30° nord/sud vers les pôles sera dévié en direction de l'ouest. On aura donc au niveau de l'équateur des vents soufflants du nord-est au sud-ouest dans l'hémisphère nord et du sud-est au nord-ouest dans l'hémisphère sud qu'on appelle les alizés. A contrario entre les latitudes 30° et 50-60° nord et sud, le vent viendra principalement de l'ouest. C'est ce que l'on appelle l'effet de Coriolis (fig.6) (17).

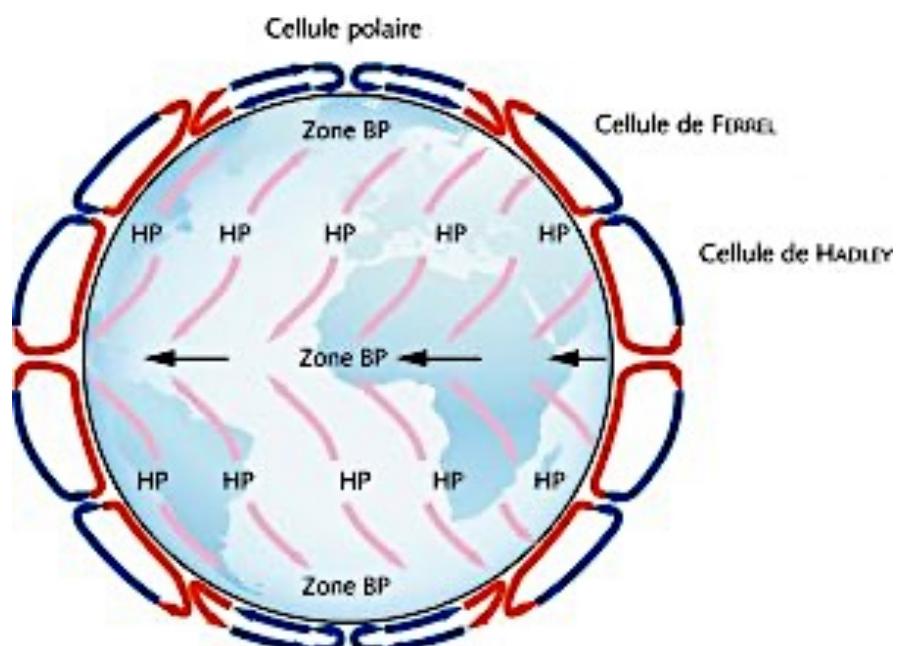


Figure 6 : Circulation des vents et effet de Coriolis (15)

#### 1.2.4. La circulation océanique : Les courants marins

Les océans à la surface du globe sont de grandes masses d'eau qui contrairement à l'idée reçue sont en mouvement continu tout autour du globe. Elles sont traversées par de grands courants marins qui à l'image d'un fleuve gigantesque tracent des voies au sein des océans. Leur circulation sur une grande partie du globe assure une répartition de la chaleur sur l'ensemble de la Terre (18). Cette action a une importance majeure dans la régulation des climats. Parmi ces courants, il en existe de deux types : de surface et profonds. Ils vont à l'échelle du globe, former une grande boucle nommée « circulation thermohaline » (fig.7).

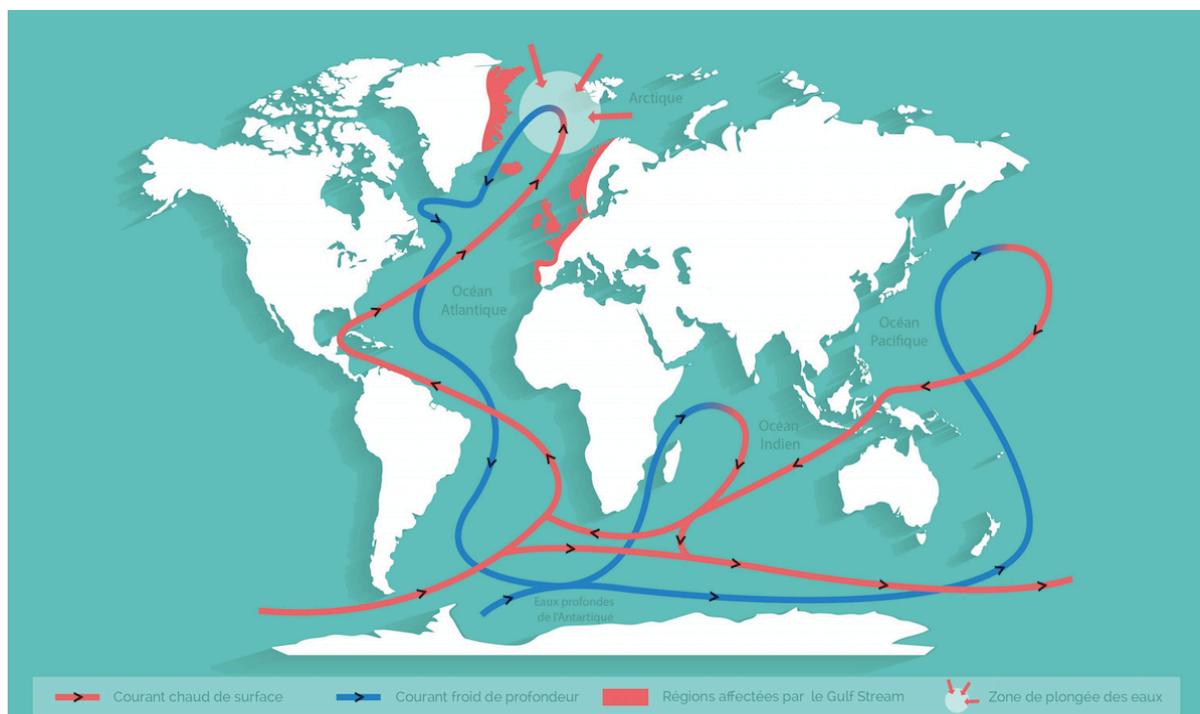


Figure 7 : Circulation océanique thermohaline (18)

Les courants de surface vont être directement liés à l'action des vents dominants décrits dans la partie précédente. C'est la présence des continents qui va les stopper et générer de grands tourbillons appelés gyres océaniques. Ces gyres sont malheureusement responsables de la formation des « continents de plastiques », c'est-à-dire des zones où s'accumulent les déchets rejetés en mer, se concentrant sur plusieurs kilomètres carrés sous l'action des courants marins (19).

Tout comme pour les vents, les courants marins vont être impactés par l'effet de Coriolis. Ainsi dans l'hémisphère nord, ils auront tendance à se diriger vers la droite tandis que dans le sud vers la gauche (fig.8). Pour illustrer ces courants de surface nous pouvons prendre l'exemple célèbre du Gulf Stream. Le Gulf Stream est un courant marin de surface chaud qui prend

naissance dans le Golfe du Mexique et qui sous l'action des vents dominants et de la rotation de la Terre va être dirigé vers les côtes européennes où il va progressivement se refroidir.

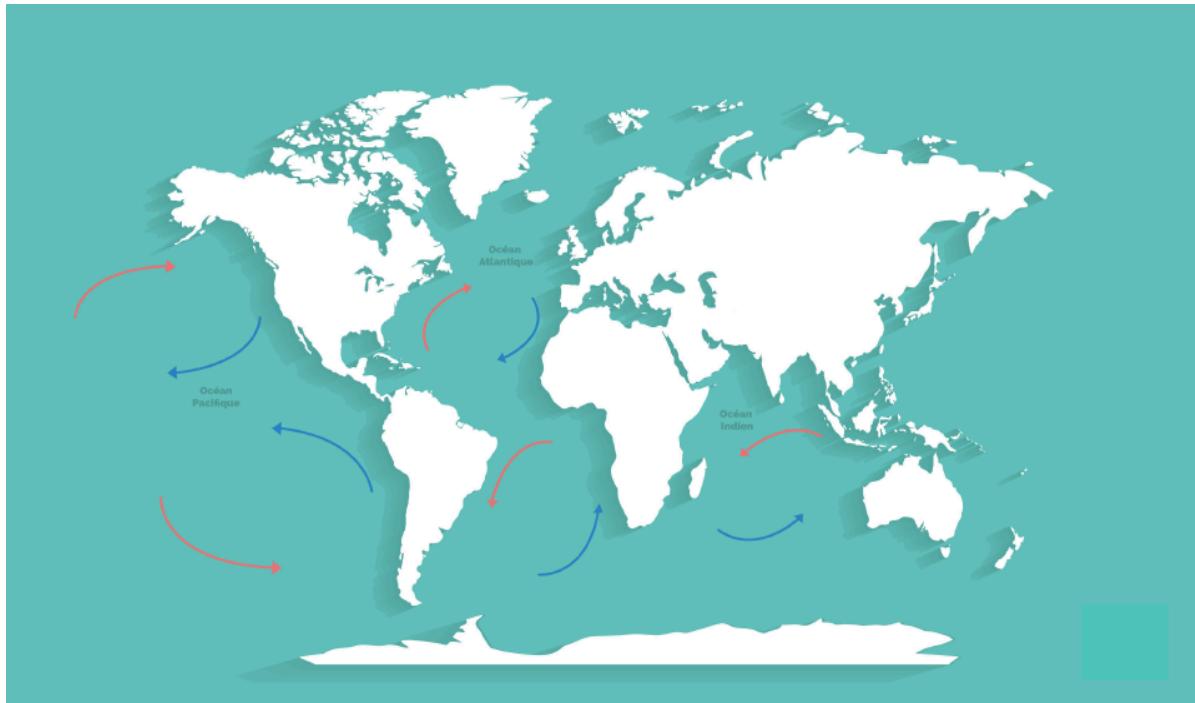


Figure 8 : Carte des courants de surfaces. Les flèches bleues représentent les courants de surface froids et les flèches rouges les courants de surface chauds (18)

Les courants profonds ne vont pas être influencés par les vents mais par la salinité et la température d'où le nom de courants de densité. C'est ainsi que le Gulf Stream chargé tout au long de son parcours par une forte salinité va une fois arrivé en mer de Norvège brutalement se refroidir, augmenter en densité et plonger en profondeur pour s'accumuler dans le bassin océanique sous-jacent : le bassin de Norvège (fig.9). Une fois le bassin rempli, le Gulf Stream va le quitter pour former le North Atlantic Deep Water (NADW) c'est-à-dire une grande autoroute sous-marine où de considérables masses (20 à 30 millions de  $m^3$  par seconde) d'eau froide chargée en sels vont se déplacer entre 2000 et 3500 mètres de profondeur de l'Atlantique nord vers l'océan circumpolaire arctique (20).

Un phénomène similaire de courants d'eaux profondes se déroule en Antarctique et plus précisément en mer de Weddel.

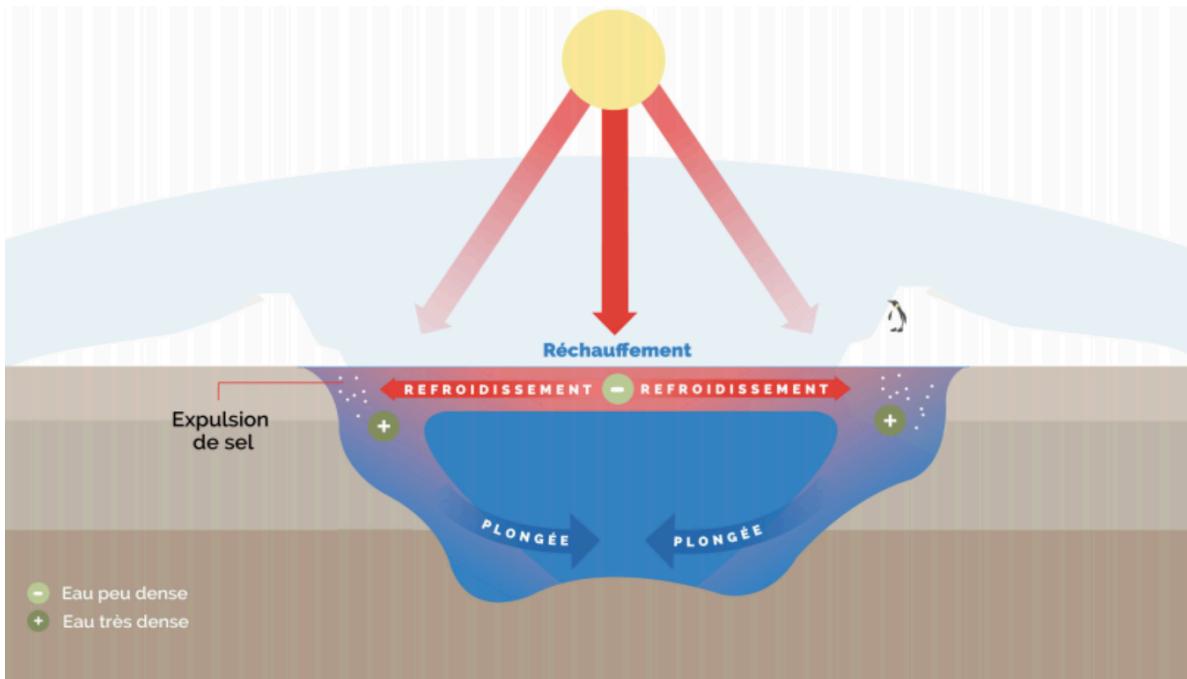


Figure 9 : La circulation thermohaline en profondeur (18)

### 1.2.5. Les phénomènes climatiques majeurs

#### a) L'ENSO

L'Oscillation Australe El Niño, également appelé E.N.S.O. en anglais, est un phénomène climatique dans le Pacifique austral ayant des répercussions sur les conditions climatiques de l'ensemble du globe. Comme nous l'avons vu précédemment, au niveau de l'équateur les vents se déplacent d'est en ouest entraînant la formation d'un courant de surface prenant la même direction. Sous l'action des rayons du soleil, la surface de l'eau va se chauffer lors de son parcours pour s'accumuler dans la partie occidentale du Pacifique. Cette accumulation d'eau chaude provoque le relargage d'énergie de l'océan vers l'atmosphère sous la forme d'une colonne d'air chaud ascendante. Une fois que l'air chaud aura atteint une certaine hauteur, il va se diriger vers l'est jusqu'à rejoindre les côtes sud-américaines où devenu froid et plus dense, il plongera vers la surface océanique et les Alizées le ramèneront de nouveau vers l'ouest.

Cette circulation convective associée aux courants marins va être responsable des grandes différences de climat entre le Pacifique occidental et austral. En effet dans la partie occidentale, les masses d'air chaud ayant passé une longue période au-dessus des océans vont se charger d'eau et vont être à l'origine de fortes précipitations. A contrario, dans le Pacifique austral l'air aura eu le temps de se décharger de son humidité et le climat y sera beaucoup

plus sec. Ce phénomène climatique n'étant pas stable, il va connaître tous les 2 à 7 ans de fortes perturbations qui vont être à l'origine de la formation d'El Niño ou de La Niña (fig.10) (21).

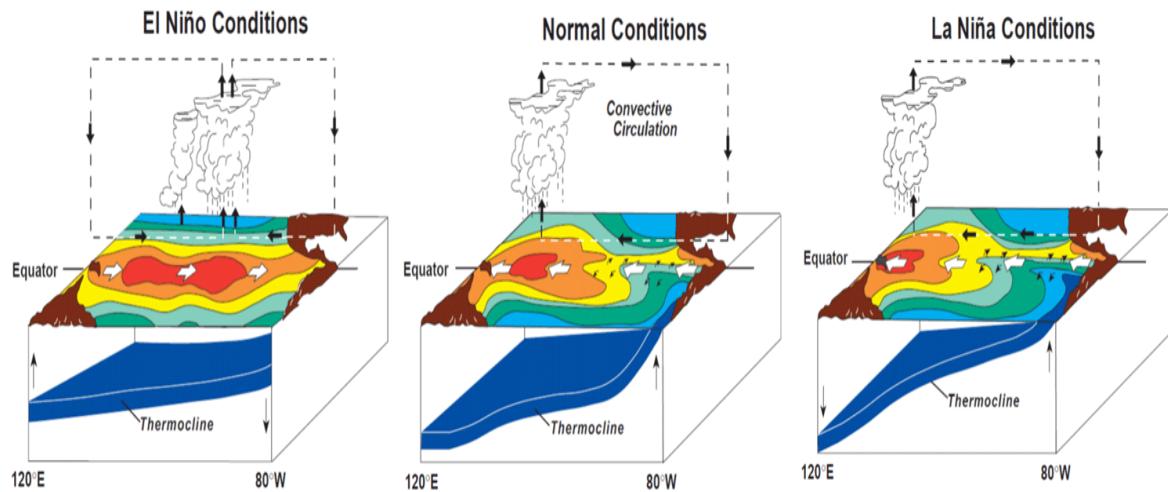


Figure 10 : Oscillation australie El Niño et La Niña (21)

Dans le cadre d'El Niño, la zone d'accumulation des eaux chaudes dans le Pacifique austral va perdre en stabilité et va se déplacer au centre de l'océan Pacifique où deux nouvelles cellules convectives vont se former. Les vents de surface chauffés vont converger des côtes vers le centre de l'océan où ils vont prendre de la hauteur, se refroidir puis provoquer de fortes précipitations jusqu'à leur retour sur les côtes. Une fois arrivé sur les côtes, l'air plus froid et déchargé de son humidité va retomber en surface sous l'état d'un air sec. Ce phénomène entraîne des modifications climatiques (fig.11), notamment en Asie du sud-est, zone normalement pluvieuse mais qui va être affectée de sécheresses à l'origine d'incendies importants, comme survenus en Australie. El Niño se forme généralement entre mars et juin puis atteint son paroxysme vers Noël d'où son nom faisant référence à la naissance de l'enfant Jésus dans la Bible. Il s'estompe entre mars et juin de l'année suivante.



Figure 11 : Impact d'El Niño sur les climats du globe (22)

Dans certaines conditions, la fin d'El Niño ne va pas entraîner un retour à des conditions habituelles mais va au contraire provoquer une situation complètement opposée qu'on appellera La Niña (fig.12). La Niña est un phénomène caractérisé par des Alizées très importants qui vont pousser d'importantes masses d'eau chaude vers le continent asiatique. Ces masses d'eau sont responsables de fortes précipitations en Asie du sud-est qui sont souvent associées à d'importantes inondations et à un refroidissement d'une grande partie de l'eau de surface de l'océan Pacifique.



Figure 12 : Impact de La Niña sur les climats du globe (22)

Au niveau météorologique, l'Europe est le continent le moins impacté par l'E.N.S.O. mais compte tenu de l'impact planétaire de ce phénomène, sa description est nécessaire à la compréhension des climats sur notre Terre.

## b) Oscillation nord-atlantique (NAO, North Atlantic Oscillation)

L'oscillation Nord-Atlantique est un phénomène climatique se déroulant dans le bassin de l'Atlantique nord et qui impacte fortement le climat européen en particulier en hiver. Il découle des variations de pression entre l'anticyclone des Açores (zone de hautes pressions) au large du Portugal et la dépression islandaise (zone de basses pressions) située entre l'Islande et le Groenland. Ces variations sont mesurées à partir de l'indice NAO qui va osciller entre 2 modes : positif et négatif (fig.13) (23).

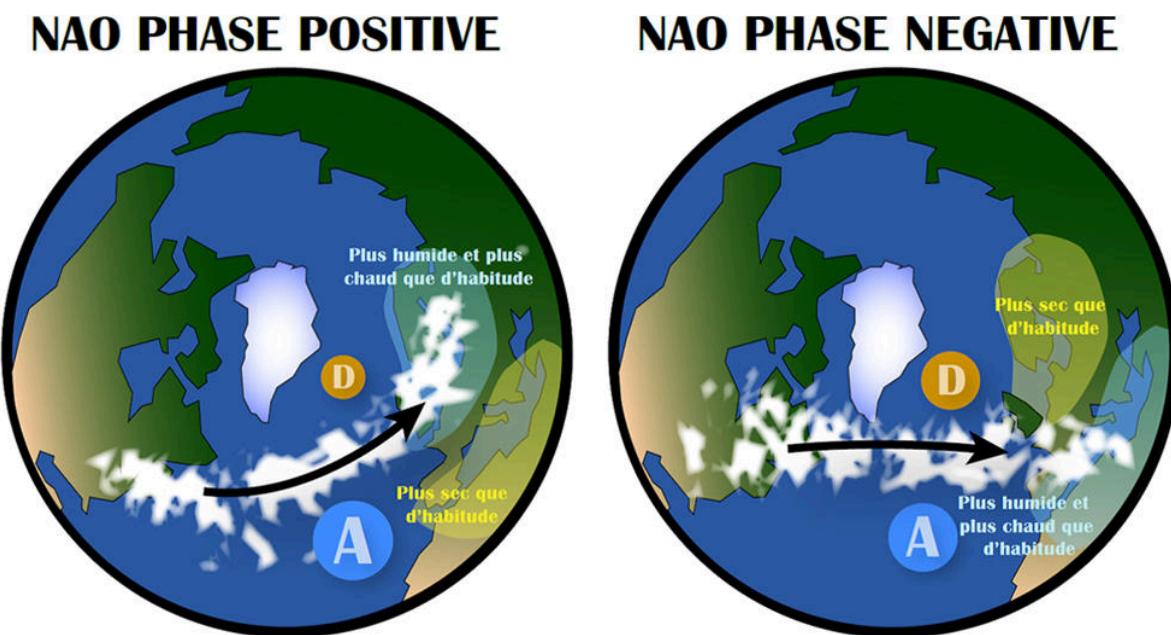


Figure 13: Carte de l'Oscillation Nord-Atlantique (NAO) en fonction de l'indice positif ou négatif (24)

Dans des conditions de NAO+, l'écart de pression entre l'anticyclone et la zone de dépression va être important. L'hiver en Europe du Nord va être de type océanique avec des températures douces, une atmosphère humide et une circulation atmosphérique des vents importante allant de l'ouest-vers le nord-ouest. A contrario l'Europe du Sud et le pourtour méditerranéen va connaître un hiver froid et sec (24,25).

Dans les conditions de NAO-, l'écart de pression va être moins marqué et les vents d'ouest de plus faible intensité et dirigés vers le bassin méditerranéen. Dans ces conditions, le climat en Europe du Nord sera de type continental avec un hiver froid et sec et en Europe centrale ainsi que dans le pourtour méditerranéen l'hiver y sera doux et humide (24,25).

## 2. Le réchauffement climatique

### 2.1. Introduction

Cette partie repose essentiellement sur des données issues du 6<sup>ème</sup> rapport d'évaluation du GIEC (Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat) également connu sous son acronyme anglophone IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (26). Son but est d'évaluer à partir d'études scientifiques pertinentes, les tenants et les aboutissants du changement climatique afin d'éclairer le choix des décideurs politiques. Le rapport définit des scénarios en fonction de l'évolution de nos émissions de gaz à effet de serre, d'ozone et d'aérosols. Ces scénarios prennent le nom de RCP pour « *Representative Concentration Pathways* » et sont suivis de chiffres qui donnent l'évolution attendue du bilan radiatif pour 2100. Ainsi le scénario RCP 2.6 repose sur une projection d'un forçage radiatif de 2,6 W/m<sup>2</sup> pour 2100 (27). Pour compléter ces projections, des scénarios tenant compte de caractéristiques socio-économiques, de stratégies d'adaptation et d'atténuation, ont été définis. Ils sont appelés SSP pour « *Shared Socioeconomic Pathways* ». Ainsi à partir des SSP, on peut définir (fig.14) les efforts à consentir pour parvenir aux RCP voulus. On peut voir que les SSP 3 et 5 sont incompatibles avec une diminution des émissions de gaz à effet de serre au plus bas niveau.

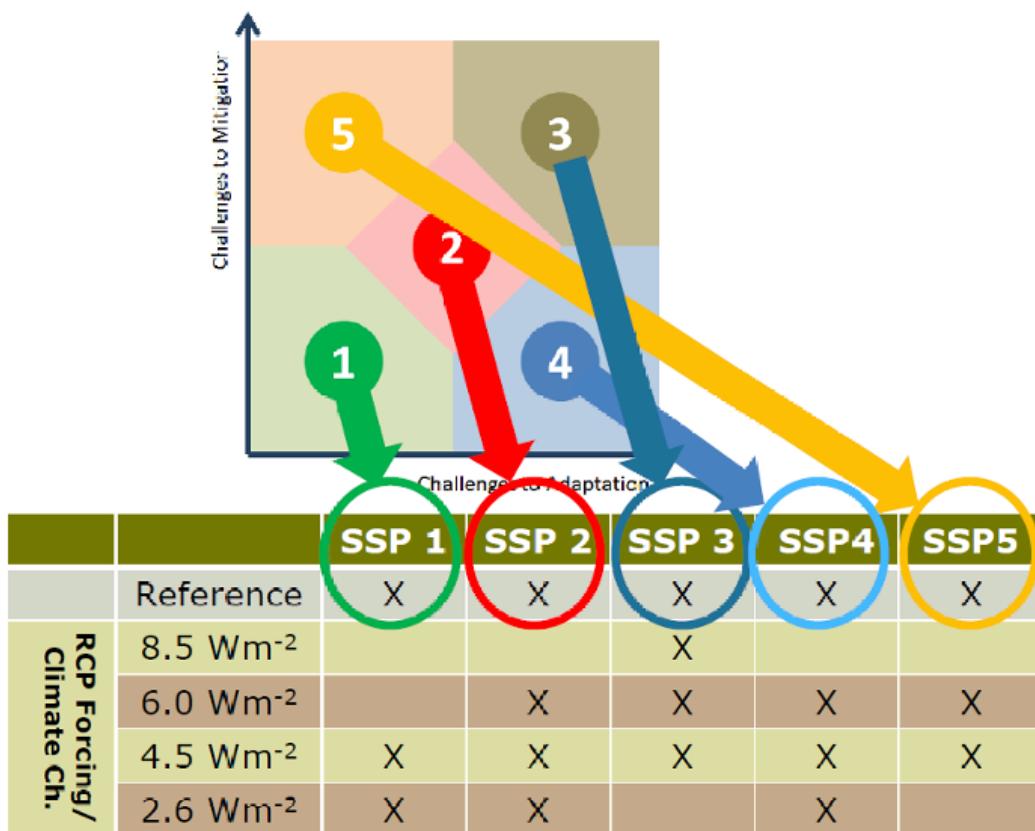


Figure 14 : Relation entre RCP et SSP selon T. Kram (27)

## 2.2. Les éléments scientifiques

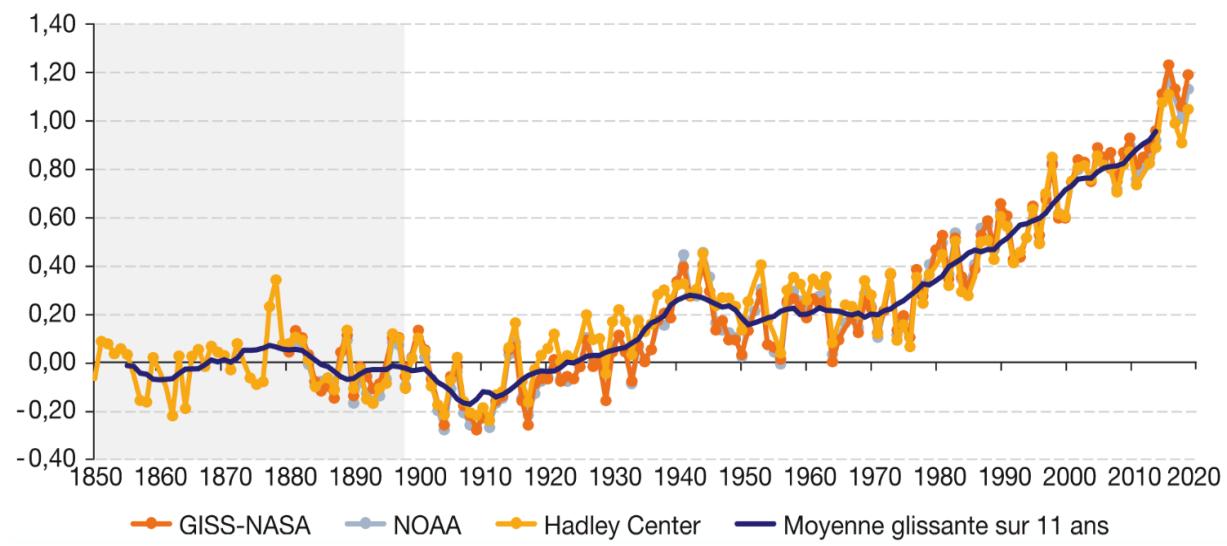
### 2.2.1. La température

Sur la figure 15, la partie grisée représente la période préindustrielle qui sert de référence pour la mesure des anomalies des températures. Elle correspond au début des enregistrements fiables des données météorologiques. Nous pouvons voir une augmentation par rapport à la période de référence à partir des années 1930 et celle-ci augmente jusqu'à atteindre un équilibre à partir des années 1940. C'est à partir des années 1980 que cette augmentation s'accélère jusqu'à atteindre  $+0,97^{\circ}\text{C}$  durant la décennie 2010-2019 (28). Sur la période 2011 à 2020, pour une augmentation totale de  $1,09^{\circ}\text{C}$  par rapport à la période préindustrielle,  $1,07^{\circ}\text{C}$  est directement lié aux activités humaines, soit la quasi-totalité de l'augmentation.

Les 10 années les plus chaudes depuis 1850 par ordre croissant sont : 2009, 2005, 2013, 2010, 2014, 2018, 2017, 2015, 2019, 2016. Depuis l'année 2019, les années 2020 et 2021 sont classées parmi ce top 10 faisant de la dernière décennie la décennie la plus chaude depuis la période préindustrielle (29). Au cours des 40 dernières années, chaque nouvelle décennie était plus chaude que celle passée. On enregistre ainsi une augmentation de  $0,66^{\circ}\text{C}$  par rapport à la moyenne de 1961 à 1990.

Ce réchauffement planétaire est variable selon les zones géographiques et est plus marqué au-dessus des continents ( $+1,59^{\circ}\text{C}$ ) qu'au-dessus des océans ( $+0,88^{\circ}\text{C}$ ) (26).

En  $^{\circ}\text{C}$   
Anomalie des températures (référence 1850-1900)



## 2.2.2. Les précipitations

Il a été observé depuis les années 1950, une augmentation de la fréquence des phénomènes de précipitation dans la plupart des zones continentales où les relevés sont fiables. Le GIEC a défini comme probable le fait que cette modification du climat soit principalement liée aux activités humaines (30).

## 2.2.3. Le niveau de la mer

Des années 1901 aux années 2018, le niveau de la mer a augmenté de 20 cm. Cette augmentation n'a pas été linéaire selon les périodes : 1,3 mm/an de 1901 à 1971 puis 1,9 mm/an de 1971 à 2006 pour atteindre 3,7 mm/an de 2006 à 2018 (28). L'augmentation annuelle du niveau de la mer a quasiment triplé entre 1901 et 2018. Un phénomène d'une telle importance n'est pas connu depuis la fin de la dernière période glaciaire il y a 11 000 ans. Le lien de causalité entre ce phénomène et les activités humaines a été qualifié de très probable par le GIEC (30).

Cette augmentation du niveau de la mer est plurifactorielle. De 1971 à 2018, elle était due à :

- L'augmentation des températures océaniques qui augmente le volume des eaux par dilatation et représente 50% de l'augmentation totale (30).
- La fonte des glaciers entraînant le passage de l'eau du réservoir continental au réservoir océanique et représente 22% de l'augmentation totale (30).
- La fonte des calottes glaciaires participe à hauteur de 20% selon le même mécanisme qu'abordé précédemment (30).
- Les modifications concernant le stockage des eaux continentales (barrage, déforestation, etc.) représentent 8% de cette augmentation (30).

Bien que l'augmentation des températures océaniques soit le facteur principal d'augmentation du niveau des océans depuis 1901, de 2006 à 2018 la somme de la fonte des glaciers et de la fonte des calottes glaciaires est devenue supérieure à celui-ci. Ce changement est dû à l'accélération du phénomène de fonte qui s'est multiplié par 4 entre la période de 1992 à 1999 et la période de 2010 à 2019 (31).

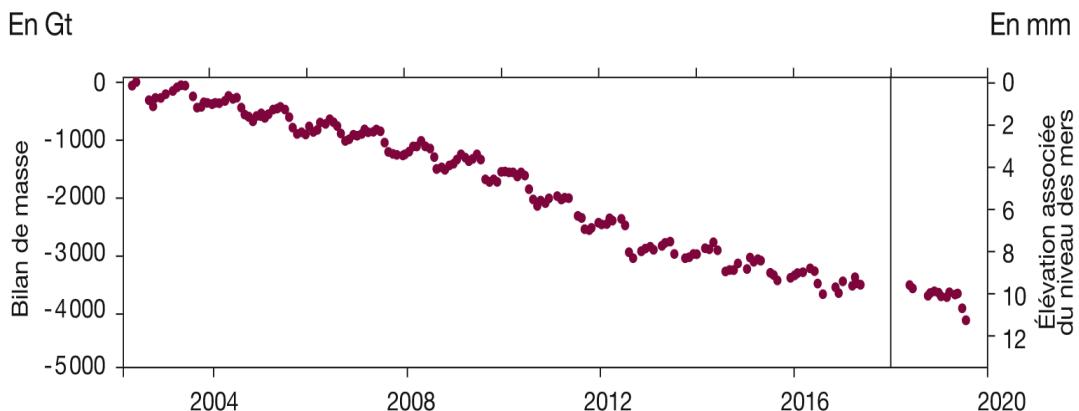
## 2.2.4. Les phénomènes extrêmes

Selon le dernier rapport du GIEC, il est pratiquement certain que le changement climatique induit par les activités humaines soit responsable de la multiplication des épisodes de chaleur extrême et de la raréfaction ainsi que de la diminution de la sévérité des phénomènes de froid extrême. Toujours selon le GIEC, il serait probable que les activités humaines soient principalement responsables de l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des précipitations depuis 1950.

A cela s'ajoute la survenue d'évènements complexes c'est-à-dire l'association de 2 évènements extrêmes comme de fortes chaleurs associées à une sécheresse ou de fortes précipitations associées à des inondations (28,29).

## 2.2.5. Fonte des glaces

Dans cette partie, trois réservoirs de glace sont à différencier. Tout d'abord les glaciers qui sont composés d'eau douce, ils recouvrent les terres et sont issus de la chute de neige qui à la suite d'un processus long se compresse jusqu'à former d'immenses masses de glace. Parmi les glaciers, on retrouve les calottes glaciaires qui recouvrent de très grandes étendues terrestres et dont l'épaisseur peut atteindre plus de 3 kilomètres. On en retrouve principalement en Antarctique et au Groenland. Selon le GIEC, Il apparaît également comme très probable que la fonte et le recul des glaciers soient en grande partie liés à l'impact des activités humaines, en particulier depuis les années 1990. Comme le montre la figure 16, La diminution de la masse des glaciers est directement liée à l'élévation du niveau des mers. Depuis 2002, la masse de la calotte glaciaire au Groenland décroît d'environ 268 Gt tous les ans. En 2019, l'été arctique a été particulièrement chaud ce qui a entraîné une décroissance de 600 Gt de glace soit une augmentation du niveau de la mer de 2,2mm (28,30,31).



Le deuxième réservoir de glace correspond à la banquise composée d'eau salée issue de la congélation de l'eau de mer de surface. Qu'elle soit sous forme solide ou liquide, elle n'influe pas sur le niveau de la mer mais sa durée de présence dans l'année est impactée par le réchauffement climatique. La banquise se forme durant l'hiver et disparaît en grande partie l'été. Il reste cependant une banquise dite « périannuelle » qui résiste à l'été. C'est elle qui est mesurée pour évaluer l'impact du réchauffement climatique. Sur la décennie 2011-2020, la surface de la banquise en Arctique a diminué d'une valeur jamais atteinte depuis le début des relevés en 1850. L'impact des activités humaines sur cette diminution de la banquise a été évalué comme très probable par le GIEC.

Le pergélisol est le 3<sup>ème</sup> réservoir de glace, plus connu sous son nom anglophone de « permafrost ». C'est un sol constamment gelé que l'on retrouve essentiellement sous les hautes latitudes. Selon le scénario le plus optimiste du GIEC, plus d'un tiers (37%) du pergélisol aura disparu d'ici la fin du 21<sup>ème</sup> siècle (30). De par sa composition, son dégel pourrait former une boucle de rétroaction positive c'est-à-dire qu'une libération massive de GES (gaz à effet de serre) entraînerait une augmentation des températures responsable à son tour d'une recrudescence du dégel. Or le pergélisol piégerait de 1460 à 1600 Gt de carbone organique soit 2 fois le carbone de l'atmosphère (30).

## 2.3. Les causes du réchauffement climatique

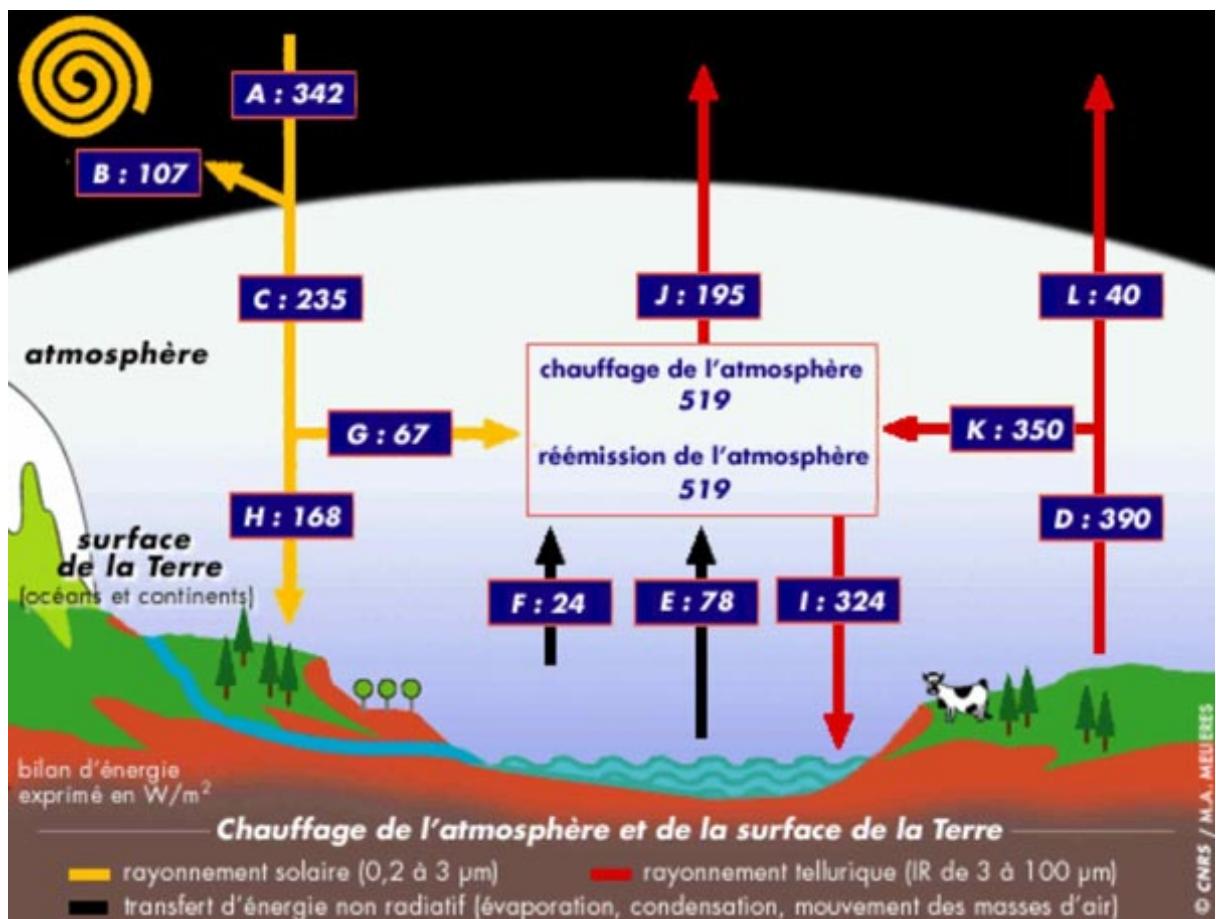
### 2.3.1. Quelques rappels

#### L'effet de serre

La température de la Terre provient de l'équilibre entre l'énergie reçue des rayonnements solaires et de l'énergie réémise sous forme de rayons infra-rouge de la Terre vers l'espace. Cependant cet équilibre est dépendant de l'atmosphère. Présente tout autour de la Terre et jusqu'à 100 km de sa surface, l'atmosphère est essentiellement composée d'azote (environ 78%) mais également d'oxygène (20,95%) et de gaz rares (1%), et dans les couches les plus basses de dioxyde de carbone (0,04%) et de méthane (1,7 ppm) (32). L'atmosphère va agir selon 2 effets principaux : tout d'abord par un effet mécanique qui empêche la chaleur de se dissiper dans l'espace en formant une couche protectrice puis par un effet de serre qui va réfléchir les rayons infrarouges émis par la Terre en direction de l'espace (33). Sans ces 2 mécanismes la Terre aurait une température moyenne de -18°C au lieu de +15°C soit un différentiel de 33°C (33,34).

L'énergie émise ou reçue s'exprime en  $\text{W/m}^2$  et à l'aide de la figure 17 nous allons détailler les différents échanges d'énergie. Le soleil est la principale source de chaleur pour la Terre avec  $342 \text{ W/m}^2$  (A) d'émis. Sur cette énergie lumineuse  $107 \text{ W/m}^2$  (B) sont réfléchis par l'atmosphère. Sur les  $235 \text{ W/m}^2$  (C) restant,  $67 \text{ W/m}^2$  (G) sont absorbés par l'atmosphère et  $168 \text{ W/m}^2$  (H) atteignent la surface terrestre. La terre va émettre sous forme de rayonnement infrarouge  $390 \text{ W/m}^2$  (D) en direction de l'atmosphère dont  $40 \text{ W/m}^2$  (L) seront libérés dans l'espace tandis que  $350 \text{ W/m}^2$  (K) seront absorbés par l'atmosphère (35).

En plus de l'énergie tellurique et de l'énergie solaire reçues, l'atmosphère perçoit  $24 \text{ W/m}^2$  de chaleur sensible (F) issue directement de la conduction entre la surface terrestre et l'air et de  $78 \text{ W/m}^2$  de chaleur latente (E) libérée lors du changement de phase de la vapeur d'eau gazeuse en eau liquide. En additionnant les sources d'énergie reçues (E, F, K et G) on arrive à un total de  $519 \text{ W/m}^2$  d'énergie émise par l'atmosphère dont  $195 \text{ W/m}^2$  (J) dans l'espace et  $324 \text{ W/m}^2$  vers la Terre. En conditions normales, le bilan radiatif est équilibré entre les  $492 \text{ W/m}^2$  reçus à la surface de la Terre (H et I) et les  $492 \text{ W/m}^2$  libérés (D, E et F), et les  $235 \text{ W/m}^2$  (C) arrivant dans l'atmosphère et les  $235 \text{ W/m}^2$  (J et L) libérés dans l'espace (35).



A, énergie émise par le soleil ; B, part de l'énergie émise par le soleil directement réfléchie par l'atmosphère de la Terre ; C, part de l'énergie émise par le soleil traversant l'atmosphère soit  $C = A - B$  ; D, rayonnement infrarouge émis par la Terre appelé rayonnement tellurique ; E, énergie libérée lors de la condensation de la vapeur d'eau appelée chaleur latente ; F, chauffage de l'air par la surface terrestre (sol, océan,...) correspondant à la chaleur sensible ; G, part de l'énergie solaire directement absorbée par l'atmosphère ; H, part de l'énergie solaire absorbée par la surface terrestre ; I, part de l'énergie atmosphérique émise vers la Terre ; J, part de l'énergie atmosphérique émise vers l'espace ; K, part de l'énergie tellurique absorbée par l'atmosphère ; L, part de l'énergie tellurique libérée dans l'espace.

### Le forçage radiatif

Le forçage radiatif exprime le changement du bilan radiatif qui est la différence entre les rayonnements solaires descendants et les rayonnements ascendants infrarouges sortant de l'atmosphère au sommet de la troposphère (de 10 à 16 km d'altitude). Il s'exprime en  $\text{W/m}^2$  et peut être soit positif si l'énergie solaire reçue est supérieure à l'énergie infrarouge réémise dans l'atmosphère ou soit négatif dans le cas contraire (36). Cette notion de forçage radiatif est utilisée par le GIEC pour déterminer l'effet des différents facteurs sur le bilan énergétique de la Terre tels que les gaz à effet de serre (GES), les aérosols, l'albédo, etc.

### 2.3.2. Les émissions de gaz à effet de serre

Les gaz à effet de serre aussi appelés GES sont des gaz qui vont participer à conserver l'énergie solaire et tellurique au détriment de son relargage dans l'espace. Ils sont les principaux responsables de la positivité du bilan radiatif.

Parmi les données permettant d'évaluer l'impact d'un gaz sur le bilan radiatif, le pouvoir de réchauffement global (PRG) ou Global Warning Potential (GWP) est le plus fiable (37). Il correspond au rapport de la tonne d'équivalence de CO<sub>2</sub> sur la tonne du gaz concerné (30,38). Plus ce rapport est important et plus son pouvoir de réchauffement potentiel augmente. Par convention, le PRG du CO<sub>2</sub> est de 1 et celui du méthane 25. Il prend en compte la durée de vie du gaz dans l'atmosphère ainsi que sa capacité à absorber les rayons infrarouges. Le PRG ainsi que la durée de vie des principaux GES sont répertoriés dans le tableau 1 ci-dessous.

Tableau 1 : Tableau de la durée de vie dans l'atmosphère et des PRG des GES (30)

Gaz à effet de serre	Pouvoir de réchauffement global (PRG) à 100 ans	Durée de vie dans l'atmosphère (année)
CO <sub>2</sub>	1	100
CH <sub>4</sub>	27,9	11,8
N <sub>2</sub> O	273	109
HFC*	2,84 à 14 600	0,219 à 228
PFC*	0,004 à 12 400	0,015 à 50 000
SF <sub>6</sub>	25 200	3 200
NF <sub>3</sub>	17 400	569

NB : HFC, Hydrofluorocarbure ; PFC, Perfluorocarbure ; SF<sub>6</sub>, Hexafluorure de soufre ; NF<sub>3</sub>, trifluorure d'azote.

#### La vapeur d'eau

La vapeur d'eau est le gaz à effet de serre dont l'impact est le plus important bien qu'il ne soit classé que troisième en quantité. Sa présence est naturelle mais sa quantité est directement liée au réchauffement climatique. En effet plus la température terrestre augmente plus la quantité d'eau atmosphérique augmente et plus le réchauffement s'accentue. Il est impossible de calculer le PRG de la vapeur d'eau car sa présence atmosphérique ainsi que son

pouvoir radiatif sont totalement dépendant des conditions climatiques dont on connaît encore trop peu les mécanismes (39).

### Le dioxyde de carbone

Le dioxyde de carbone est un gaz naturel émis par l'activité de la biosphère (respiration des animaux et des végétaux mais également un gaz industriel libéré lors de la combustion de matières d'origine organique. Le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) est le principal gaz à effet de serre dans l'atmosphère et représente 66% du forçage radiatif. Cette part augmente à 82% lorsque l'on s'intéresse uniquement à la dernière décennie. Sa concentration au début des relevés atmosphériques durant la période préindustrielle était de 278 ppm et correspondait au point d'équilibre entre les flux atmosphérique, océanique et de la biosphère. Depuis, ce taux a augmenté de 149% pour atteindre 410 ppm en 2019. L'augmentation au cours de la dernière décennie est de 2,4 ppm/an (30,40). Les sources émettrices sont :

- La combustion des énergies fossiles = 35 GtCO<sub>2</sub>
- La déforestation et le changement d'affectation des terres = 6 GtCO<sub>2</sub>

Les émissions de CO<sub>2</sub> ont été absorbées à 46% par l'atmosphère, 23% par les océans et 31% par les terres émergées (fig.18).

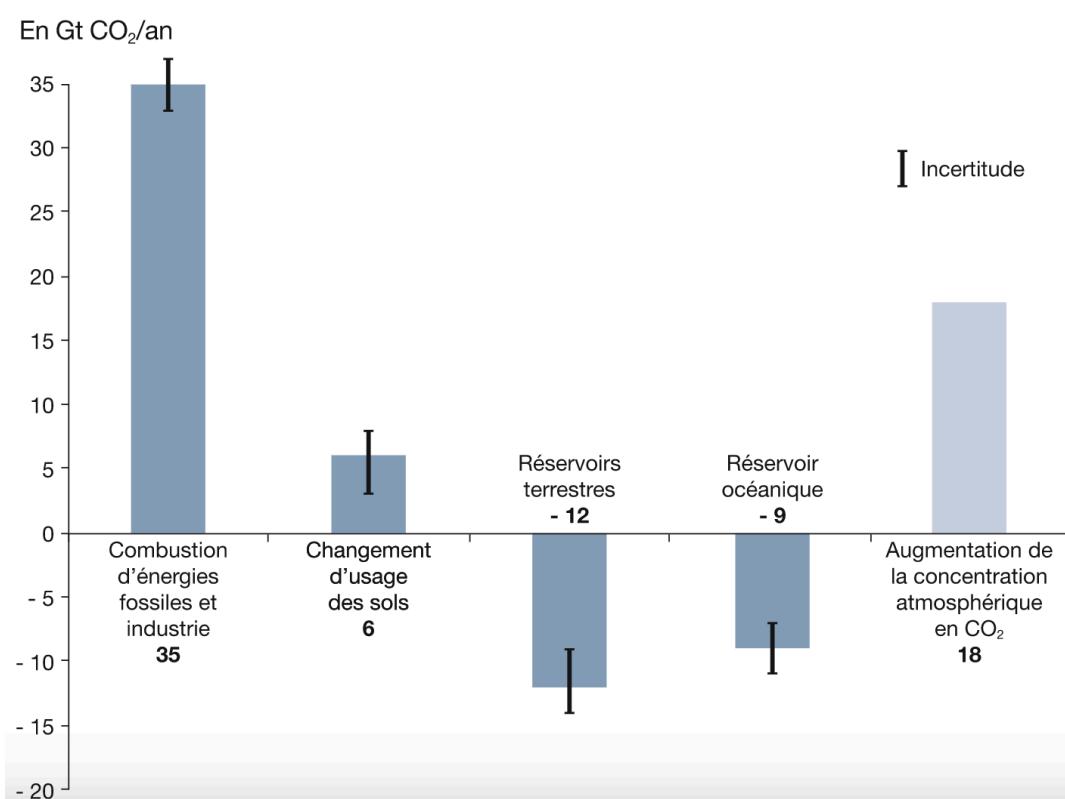


Figure 18 : Flux annuel net en fonction de l'origine du CO<sub>2</sub> de 2009 à 2018 (38)

## Le méthane

Le méthane ( $\text{CH}_4$ ) est responsable quant à lui de 16% du forçage radiatif des GES. Malgré une durée de vie atmosphérique presque 10 fois moins longue que le  $\text{CO}_2$ , son PRG est cependant 25 fois plus important. Cela s'explique notamment par sa capacité importante à absorber les rayonnements infrarouges. C'est un gaz naturel émis par les organismes vivants lors de processus de fermentation ou de digestion. Cependant les activités humaines telles que l'élevage, l'agriculture, le traitement des déchets et l'exploitation des ressources fossiles ont amplifié la production de ce gaz qui représente aujourd'hui 60% des émissions contre 40% pour les émissions naturelles de la biosphère (zones humides, animaux, etc.). On retrouve ce gaz à la concentration moyenne de 1889 ppb contre une valeur préindustrielle de 722 ppb soit une augmentation de 262% (30,38,41).

## L'oxyde nitreux

L'oxyde nitreux ou  $\text{N}_2\text{O}$  est le quatrième acteur du forçage radiatif (3%). Ses origines d'émission sont à l'opposé du méthane avec 60% d'origine naturelle contre 40% d'origine humaine. Les océans, les sols sont de grandes sources de production tout comme l'agriculture avec l'utilisation d'engrais, la combustion de matières organiques ou les productions industrielles comme le nylon, etc. L'utilisation d'engrais représente 70% des émissions d'origine humaine de  $\text{N}_2\text{O}$ . Au cours de ces 40 dernières années, l'émission anthropique a augmenté de 30% pour atteindre aujourd'hui 7,3 millions de tonnes d'azote par an. La concentration moyenne annuelle de  $\text{N}_2\text{O}$  atteint aujourd'hui 333,2 ppb contre 270 à l'ère préindustrielle soit une augmentation de 123% (30,38,41).

## Les hydrocarbures halogénés et composés apparentés

Les hydrocarbures halogénés ou halocarbures sont des molécules composées d'atomes de carbone, d'hydrogène, et d'atomes de chlore, de fluor ou de brome (42). Leur quantité dans l'atmosphère est faible comparée aux autres gaz précédemment cités. Cependant leur activité chimique ainsi que leur durée de vie pouvant être de 45 ans à plus de 50 000 ans, ceci en fait de redoutables gaz à effet de serre. On retrouve des valeurs de PRG allant de 4 à 14 800. Pour la sous-classe des hydrocarbures fluorés le PRG moyen est de 2800 fois le PRG du  $\text{CO}_2$  (30,38,41). Les hydrocarbures de par leur stabilité chimique sont également la principale cause d'appauvrissement de la couche d'ozone. Ils sont responsables de 11% du forçage radiatif induit par les GES.

Ces composés sont essentiellement d'origine synthétique c'est-à-dire produits par l'homme. On les retrouve dans bon nombre d'appareils comme les systèmes de climatisation, les extincteurs d'incendie, ainsi que dans la fabrication de composés comme les solvants, isolants et aérosols. Pour la majorité des hydrocarbures halogénés, leur diffusion dans l'air a beaucoup augmenté jusque dans les années 1995 pour atteindre une relative stabilisation, voire une baisse grâce aux mesures de remplacement prises lors du protocole de Montréal en 1985 (fig.19).

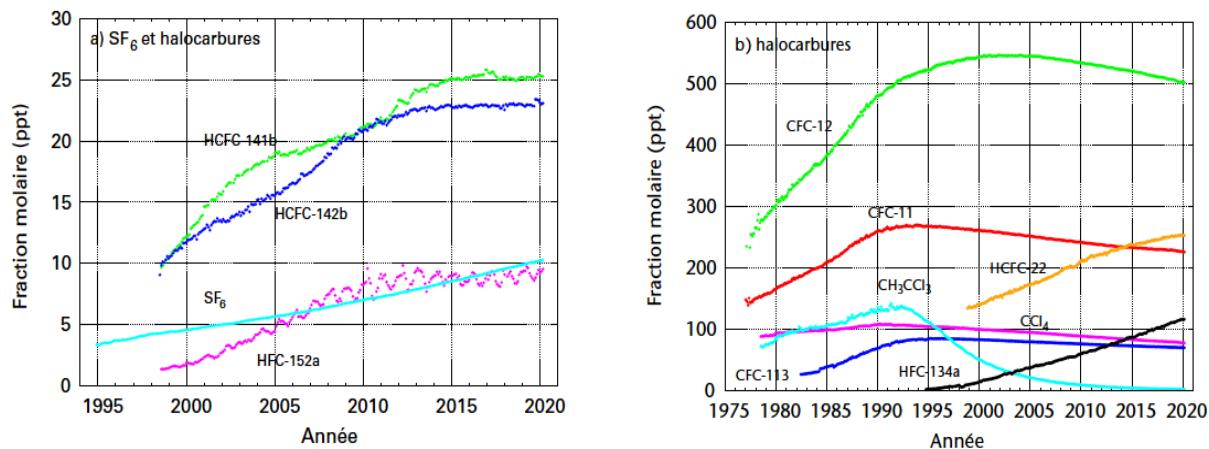


Figure 19 : Evolution mensuelle moyenne du SF<sub>6</sub> et des principaux hydrocarbures halogénés. (a) SF<sub>6</sub> et halocarbures à faible fraction molaire ; (b) halocarbure à fraction molaire plus élevée (41)

## L'ozone

L'ozone (O<sub>3</sub>) est une molécule essentiellement d'origine naturelle (90%) qui se retrouve dans la stratosphère. Elle retient une partie des rayonnements ultra-violets issus de l'espace, ceux pouvant avoir une action fortement cancérogène. Par ailleurs, 10% de l'ozone sont d'origine humaine et émis lors de la combustion d'énergies fossiles et de certaines activités industrielles. Celui-ci est essentiellement retrouvé dans les couches basses de l'atmosphère et va participer au forçage radiatif. Sa durée de vie variant de quelques semaines à quelques mois, son impact est moins marqué que pour les autres gaz.

## Gaz à effet de serre indirect

Les gaz à effet de serre indirects ne vont pas avoir d'impact immédiat sur le réchauffement climatique mais leur présence dans l'atmosphère va potentialiser l'effet des gaz à effet de serre à action directe. On retrouve dans cette catégorie le monoxyde de carbone (CO), les oxydes d'azote réactifs (NO<sub>x</sub>), les composés organiques volatiles (COV) qui sont essentiellement émis par les activités humaines.

### **2.3.3. Le rôle des aérosols**

Les aérosols sont de fines particules microniques voir submicroniques en suspension dans l'air. Elles vont avoir des origines naturelles (poussière désertique, cendres, embruns, ...) ou industrielles. Les aérosols vont agir de manière directe et indirecte sur le bilan radiatif de la Terre. Tout d'abord, ils vont absorber et rétrodiffuser les rayons lumineux en provenance du soleil. C'est ce que l'on appelle l'effet direct. Il va avoir pour effet de réduire la quantité d'énergie entrante dans l'atmosphère ce que l'on appelle le forçage radiatif négatif. Pour que les nuages se forment, les aérosols vont être indispensables. En effet ils vont jouer le rôle de noyaux de condensation c'est-à-dire qu'ils vont permettre à la vapeur d'eau de se condenser en fines gouttelettes à l'origine des nuages. Les caractéristiques du nuage vont dépendre de la concentration en aérosols et de leur composition chimique. Plus les aérosols vont être fins plus le réseau de gouttelettes d'eau va être serré et plus le nuage va être opaque. Plus l'opacité augmente et plus la part des rayons réfléchis ou absorbés sera importante (43). C'est ce que l'on appelle l'effet indirect des aérosols qui entraîne un forçage radiatif négatif mais qui sera plus ou moins marqué selon les caractéristiques physico-chimiques des aérosols et donc du nuage. Selon le GIEC, la valeur de l'action des aérosols sur le forçage radiatif serait de  $-1,1 \text{ W. m}^{-2}$  (30,38,41).

### **2.3.4. Le rôle de l'activité volcanique dans l'effet de serre**

Les éruptions volcaniques vont rejeter dans l'atmosphère des quantités énormes de gaz et d'aérosols tels que des molécules halogénées, du  $\text{SO}_2$ , des cendres, etc. Ce largage atmosphérique va directement impacter la composition de l'air ainsi que les réactions chimiques dans l'atmosphère. Les éruptions volcaniques de grande importance étant rares, leur action sur le bilan radiatif de la Terre sur plusieurs décennies n'est qu'infime. Cependant elles peuvent avoir d'importantes répercussions sur plusieurs mois voire années.

L'éruption du Tambora en Indonésie en avril 1815 a entraîné un refroidissement moyen de la Terre de  $0,7^\circ\text{C}$  durant l'année qui a suivi. Plus récemment, l'éruption du volcan Pinatubo aux Philippines en juin 1991 a provoqué un refroidissement global d'environ  $0,4^\circ\text{C}$  l'année suivante (44). L'impact climatique va dépendre de la magnitude et de la dispersion du nuage émis par le volcan et par la localisation géographique de l'éruption.

### 2.3.5. Les modifications de l'albédo

L'albédo désigne la part de l'énergie solaire réfléchie vers l'espace. Il a une valeur allant de 0 pour une surface absorbant la totalité de l'énergie solaire à 1 pour une surface qui réfléchira la totalité du rayonnement reçu (45). Plus la valeur se rapprochera de 0 plus la surface aura une action positive sur le forçage radiatif et inversement. Ainsi la neige fraîche va avoir un albédo autour de 0,85 tandis que l'asphalte en aura un d'environ 7,5 (fig.20). La diminution des précipitations neigeuses et la construction de routes bitumées aura donc un impact positif (réchauffement) sur le bilan radiatif de la Terre. Ce sont les nuages qui vont avoir le plus grand rôle dans l'albédo.

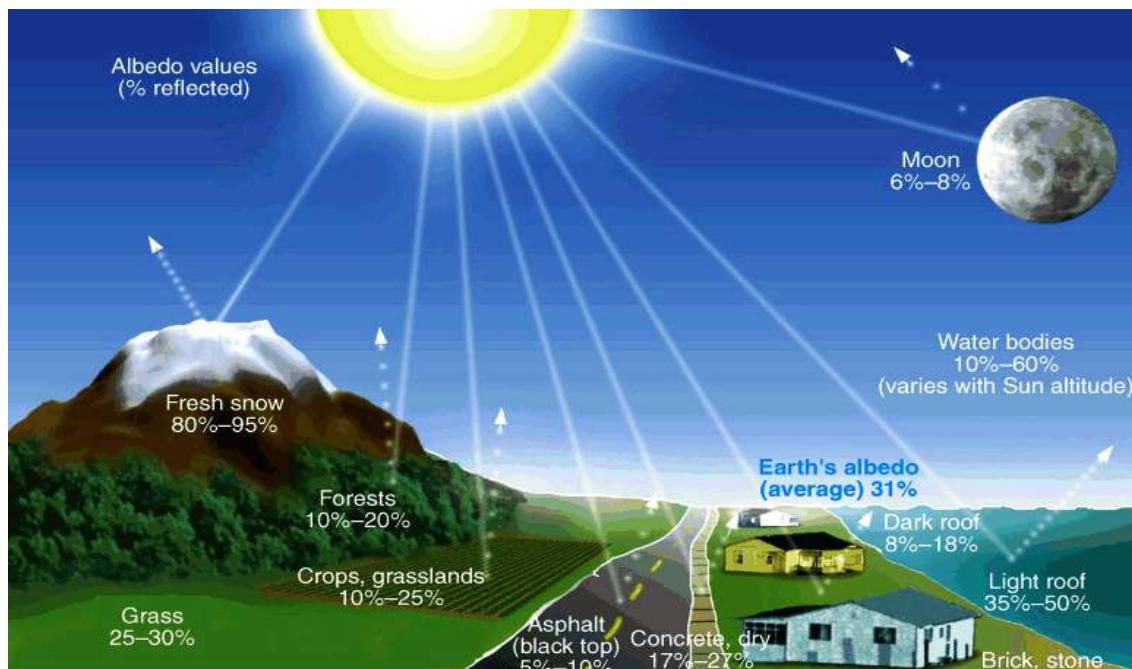


Figure 20 : Rôle de l'albédo dans l'absorption et la réflexion des rayons solaires (45)

### 2.3.6. L'activité solaire

L'activité solaire a un impact sur le réchauffement planétaire. Cette activité a un impact global compris entre  $+0,1$  et  $+0,2 \text{ W.m}^{-2}$  et se mesure sur un cycle de 11 ans. Depuis 1975, l'activité solaire augmente mais aucune étude même empirique n'arrive à établir de lien direct entre réchauffement planétaire et activité solaire (46,47).

### 2.3.7. Conclusion

L'impact des facteurs entraînant un forçage radiatif positif surpasse largement l'effet des facteurs ayant un impact négatif comme le montre la valeur du forçage radiatif effectif (ERF) (fig.21).

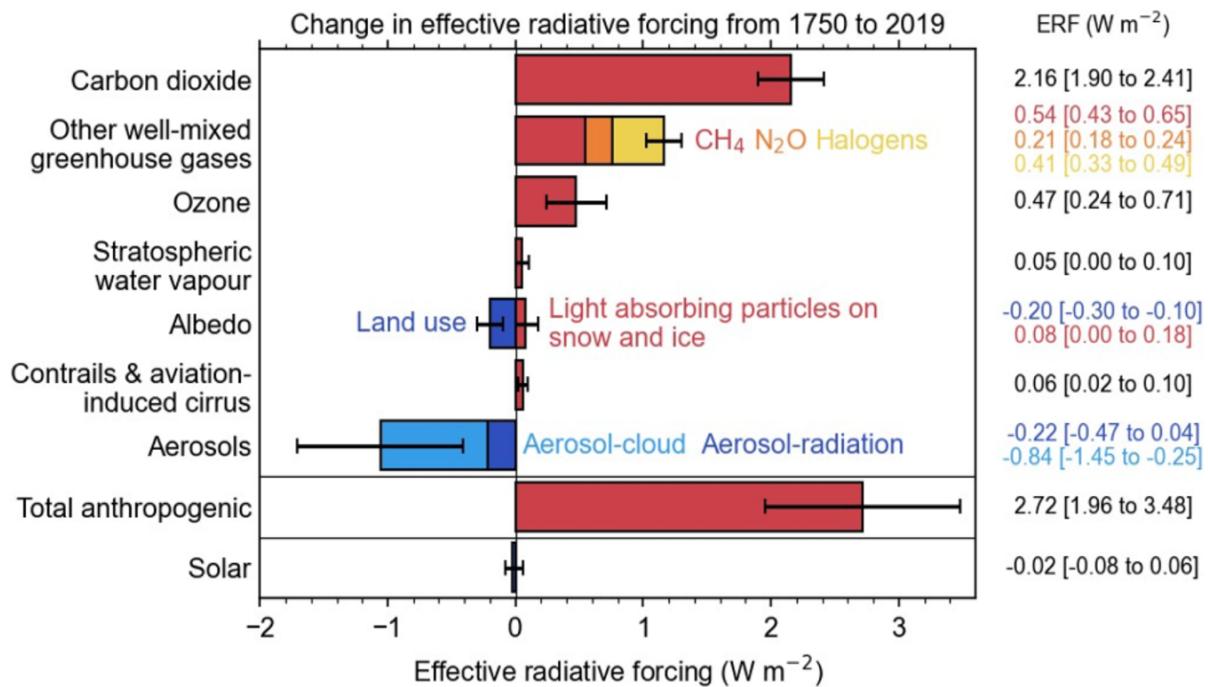


Figure 21 : Impact des facteurs sur la forçage radiatif de 1750 à 2019 en  $\text{W.m}^{-2}$  (48)

ERF Dioxyde de carbone =  $2,16 \text{ W.m}^{-2}$ , ERF Méthane =  $0,54 \text{ W.m}^{-2}$ , ERF Hydrocarbures halogénés =  $0,41 \text{ W.m}^{-2}$ , ERF Oxyde nitreux =  $0,21 \text{ W.m}^{-2}$ , ERF Ozone =  $0,47 \text{ W.m}^{-2}$ .

Cette tendance s'accentue chaque année avec un taux d'accroissement qui ne cesse de s'amplifier depuis les années 1970 (fig.22). Cette bascule importante de l'ERF s'explique en grande partie par l'impact des activités humaines sur les équilibres gazeux atmosphériques. Un déséquilibre que la biosphère n'arrive plus à réguler tant le phénomène est marqué.

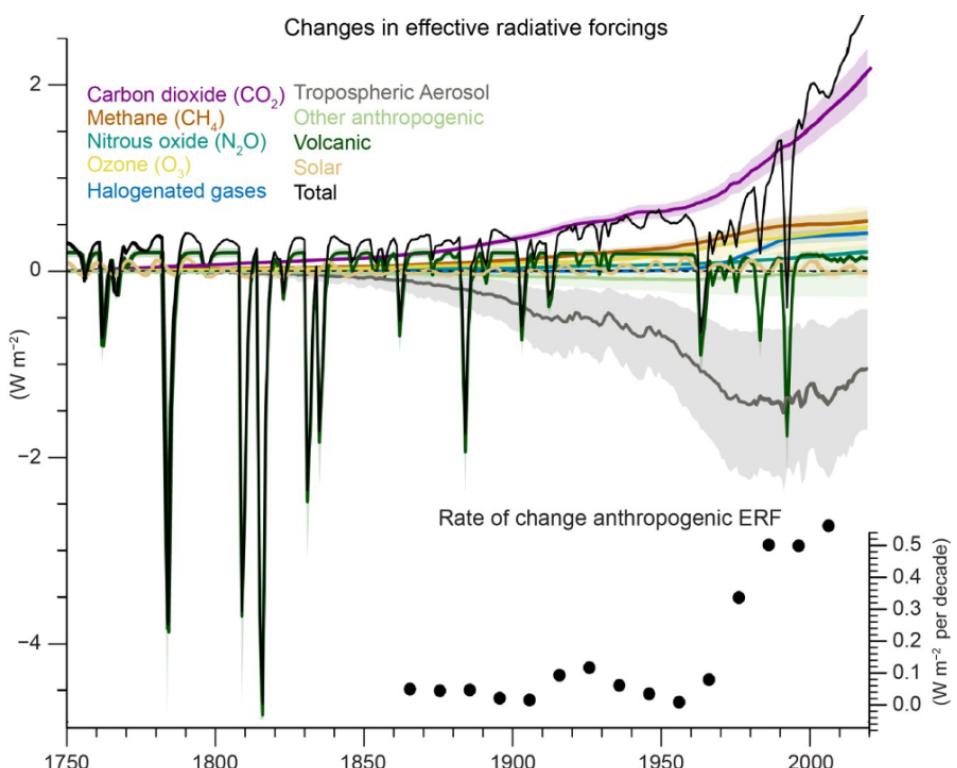


Figure 22 : Evolution du forçage radiatif effectif de 1750 à 2019 (48)

## 2.4. Les projections du GIEC

### 2.4.1. Les scénarios

Le GIEC à défaut de pouvoir prédire l'avenir et donner des conseils pour les politiques, dresse un panel de 5 grands scénarios permettant à partir des différentes émissions de CO<sub>2</sub> de décrire les conséquences climatiques qui en découleraient. Les scénarios SSP (Shared Socioeconomic Pathways) sont des modèles complexes associant des facteurs sociaux-économiques comme la population, la technologie, les relations internationales, à des hypothèses d'évolution d'émission de gaz à effet de serre qui sont les scénarios RCP (Representative Concentration Pathways) (49). Pour chaque scénario, il a été défini des estimations du différentiel de température entre notre ère et la période préindustrielle (tableau 2).

Tableau 2 : Evolution de la température mondiale à la surface de la Terre pour trois périodes de 20 ans au regard des 5 scénarios SSP étudiées par le GIEC pour l'AR6 (30)

Scénario	Court terme (2021-2040)		Moyen terme (2041-2060)		Long terme (2081-2100)	
	Meilleure estimation (°C)	Fourchette très probable (°C)	Meilleure estimation (°C)	Fourchette très probable (°C)	Meilleure estimation (°C)	Fourchette très probable (°C)
SSP1-1.9	1,5	1,2 à 1,7	1,6	1,2 à 2,0	1,4	1,0 à 1,8
SSP1-2.6	1,5	1,2 à 1,8	1,7	1,3 à 2,2	1,8	1,3 à 2,4
SSP2-4.5	1,5	1,2 à 1,8	2,0	1,6 à 2,5	2,7	2,1 à 3,5
SSP3-7.0	1,5	1,2 à 1,8	2,1	1,7 à 2,6	3,6	2,8 à 4,6
SSP5-8.5	1,6	1,2 à 1,9	2,4	1,9 à 3,0	4,4	3,3 à 5,7

#### a) Scénario SSP1 – 1.9

Il s'agit du scénario le plus optimiste de l'AR6 (« Assessment Report » se traduisant par « rapport d'évaluation ») mais également le seul qui permettrait de répondre aux objectifs définis par l'Accord de Paris qui étaient de limiter l'augmentation des températures à 1,5°C par rapport à l'ère préindustrielle. Le seul moyen d'y parvenir est de réduire les émissions de dioxyde de carbone à 0 d'ici 2050. Dans ce scénario, les sociétés doivent mettre en place des pratiques durables leur permettant d'atteindre l'objectif et de réduire les inégalités. Elles investissent dans l'éducation et la santé et entament une décroissance économique. Dans ces conditions, la planète atteindra +1,5°C d'ici 2040, les dépassera pour atteindre un pic à +1,6°C à moyen terme puis diminuera à +1,4°C d'ici la fin du siècle (30,50,51).

### **b) Scénario SSP1 – 2.6**

Ce scénario est le deuxième plus optimiste. Les états prennent la même orientation politique que dans le précédent scénario mais ils ne parviennent pas à réduire leurs émissions de CO<sub>2</sub> à 0 avant 2050 mais plus tard. Dans ces conditions, la température moyenne globale de la planète se stabilise à +1,8°C à la fin du siècle (30,50,51).

### **c) Scénario SSP2 – 4.5**

C'est le scénario intermédiaire dans les projections du GIEC. Les sociétés entament une transition lente vers les énergies renouvelables sans que de réels bouleversements sociaux-économiques n'aient lieu. Les inégalités de revenus et de développement continuent de s'accroître. Les émissions de CO<sub>2</sub> après une longue phase d'équilibre entament une lente diminution insuffisante pour atteindre des émissions nulles d'ici 2100. A la fin du siècle les températures sont de 2,7°C supérieures aux valeurs préindustrielles (30,50,51).

### **d) Scénario SSP3 – 7.0**

Dans ce scénario, les émissions de CO<sub>2</sub> ainsi que les températures augmentent progressivement pour atteindre 3,6°C de plus que la période préindustrielle à la fin du 21<sup>è</sup> siècle. La quantité de CO<sub>2</sub> aura doublé en 2100. Les sociétés deviennent de plus en plus compétitives et cherchent à assurer et à sécuriser leurs approvisionnements alimentaires (30,50,51).

### **e) Scénario SSP5 – 8.5**

C'est le pire scénario où les émissions de CO<sub>2</sub> ont doublé en 2050. Il y a une forte croissance de l'économie mondiale reposant sur l'exploitation des ressources fossiles et sur un mode de vie très polluant. Les températures augmentent de plus en plus pour atteindre +4,4°C en 2100 (30,50,51).

## 2.4.2. Les changements attendus

### a) Les Gaz à effet de serre

L'évolution des émissions de GES est directement impactée par les activités humaines. Sur la figure 23, nous pouvons voir l'évolution prévisible de ces émissions en fonction des scénarios établis par le GIEC. Sur les 5 scénarios seulement 2 permettent d'atteindre avant 2100 une émission mondiale nette négative de CO<sub>2</sub> (c'est-à-dire moins d'émission que d'absorption). A contrario, les deux scénarios développant une politique de croissance économique reposant sur l'exploitation de ressources fossiles entraînent des augmentations des concentrations du dioxyde de carbone 2 à 3 fois supérieures à celles d'aujourd'hui. Pour ce qui s'agit du méthane, des oxydes nitreux et du dioxyde souffre, dans tous les scénarios hormis le SSP5-8.5 (le moins optimiste), les émissions de ces gaz sont amenées à se stabiliser voir à diminuer d'ici 2100 (52).

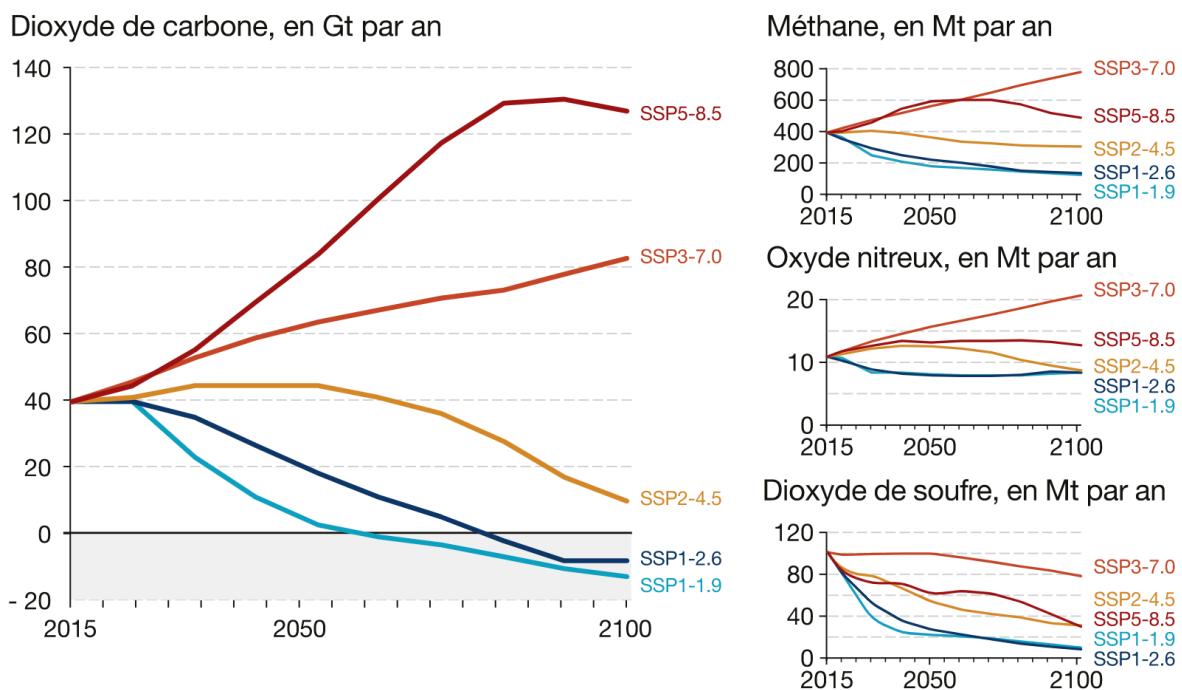


Figure 23 : Evolution des émissions par an des GES en fonction des 5 scénarios SSP définis par le GIEC en 2021 (52)

### b) Les températures

Selon le tout dernier rapport du GIEC, qu'importe le scénario, les températures continueront d'augmenter au moins jusqu'en 2050. En effet, au vu de la durée de vie des GES (100 ans pour le dioxyde de carbone), leurs actions vont perdurer dans le temps même si leur émission diminue drastiquement. On obtient respectivement pour les scénarios SSP1-1.9, SSP1-2.6,

SSP2-4,5, SSP3-7.0 et SSP5-8.5 des températures supérieures à l'âge préindustriel de 1,4°C, 1,8°C, 2,7°C, 3,8°C, 4,4°C (fig.24) (30,52).

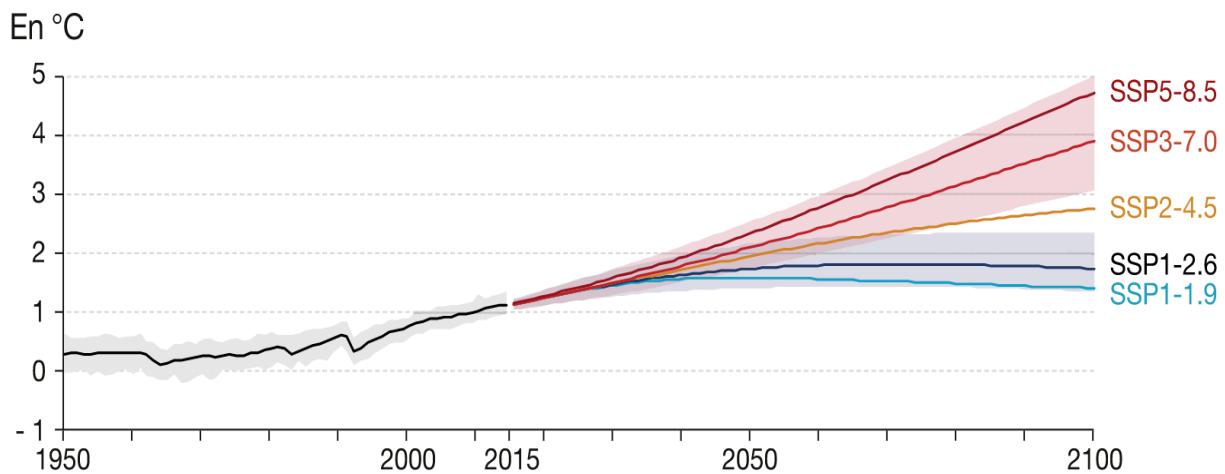


Figure 24 : Projection de l'évolution des températures moyennes annuelles de 2015 à 2100 selon différents scénarios SSP (52)

Lorsque l'on parle d'augmentation des températures, il est important de noter qu'il ne s'agit que de la moyenne globale terrestre annuelle. Cependant d'une région à l'autre ce réchauffement sera plus ou moins marqué. Ainsi dans un scénario à +3°C d'ici 2100, l'Alaska, la Russie, le Groenland pourraient connaître une hausse de 5 à 6°C alors que pour l'Argentine et l'Inde, celle-ci serait limitée à 2 ou 3°C (fig.25). Les hausses de température seront plus marquées sur les hautes latitudes de l'hémisphère nord ou sur les terres émergées par rapport aux océans (53).

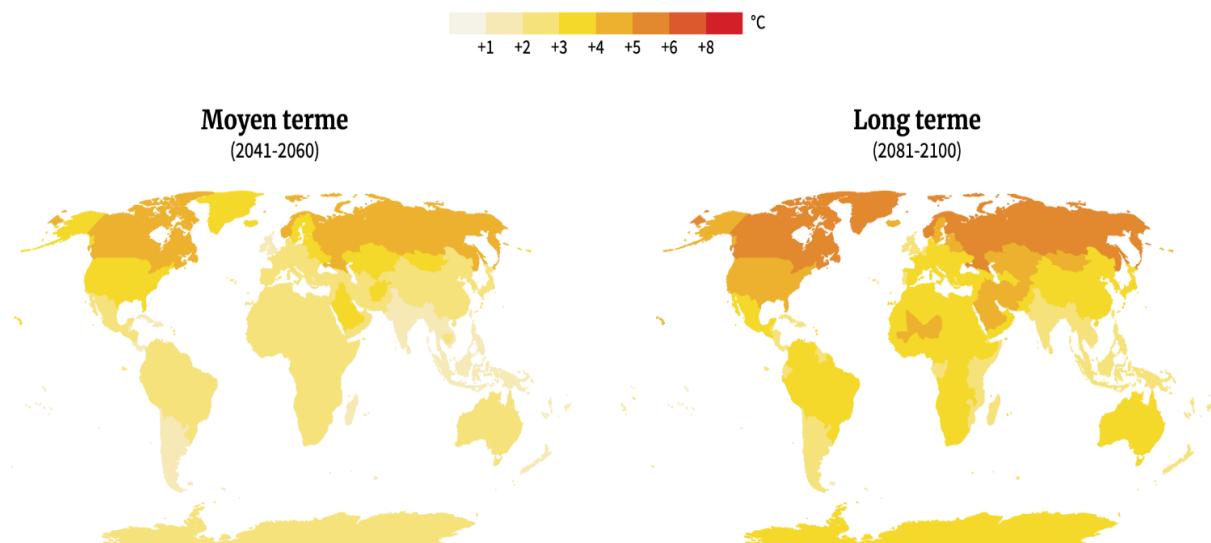
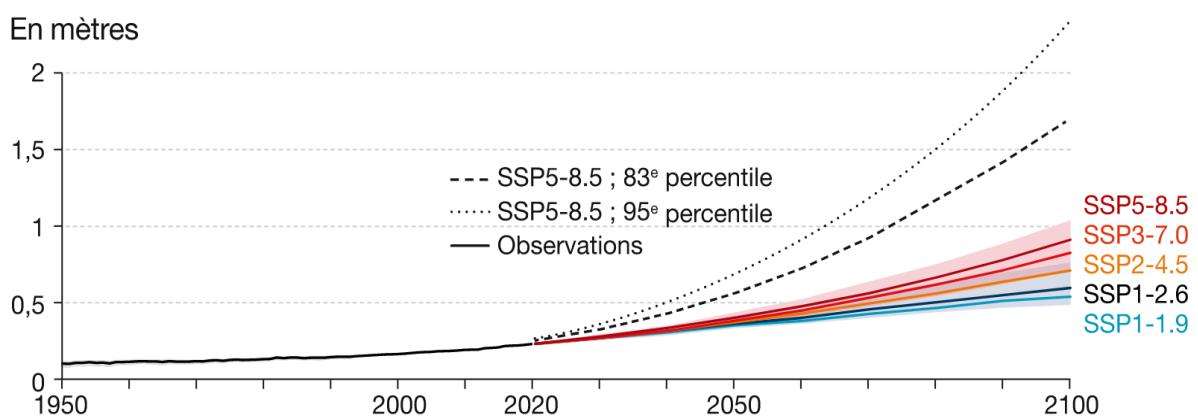


Figure 25 : Projection d'évolution des températures moyennes annuelles par pays dans un scénario de réchauffement de la température annuelle moyenne globale à +3°C d'ici 2100 (par rapport à la période préindustrielle) (53)

### c) Le niveau de la mer

L'augmentation des températures conduit selon plusieurs mécanismes (dilatation des océans, fonte des glaciers, fonte du pergélisol) à une élévation du niveau des océans. Quel que soit le scénario du GIEC choisi, le niveau des océans continuera à augmenter comme le montre la figure 26. Cette augmentation ira de 28 à 55 cm pour le scénario le plus optimiste et de 63 à 102 cm pour le scénario le plus délétère. Cette hausse sera à l'origine de grandes migrations de populations. On estime à plus d'1 milliard d'humains vivant sur les basses terres côtières dont l'altitude est inférieure à 10 mètres par rapport au niveau de la mer, qui devront quitter leur zone d'habitat.



### d) La cryosphère

Dans tous les scénarios étudiés, il est hautement probable que la cryosphère continue à se réduire durant les prochains siècles. On va donc assister à la fonte progressive des différents glaciers de la Terre ainsi qu'à la fonte du permafrost. La fonte du permafrost sera un facteur important de relargage de GES dans l'atmosphère avec toutes les conséquences que l'on connaît sur le réchauffement planétaire. L'Arctique sera d'ici 2050 au moins une fois dépourvu de banquise au mois de septembre. La couverture neigeuse saisonnière va également décroître au cours des prochaines décennies (30).

### e) Les précipitations

Comme le montre la figure 27, le réchauffement climatique aura un impact sur la répartition des précipitations à la surface du globe. On aura ainsi pour les régions méditerranéennes, l'Amérique centrale et du sud, le sud de l'Afrique et la côte sud-ouest de l'Australie une

raréfaction des précipitations et une augmentation de la fréquence des périodes de sécheresse. A contrario, l'Afrique tropicale, l'Amérique du Nord, l'Asie et l'Europe (hors pourtour méditerranéen) feront face à une augmentation des précipitations. Il apparaît clairement que ces prévisions s'accentuent en fonction des trajectoires de hausse des températures (30,53,54).

Ces bouleversements découlent d'une accélération du cycle de l'eau causée par le réchauffement des surfaces terrestres mais également par une perturbation des vents et courants marins qui sont de grands régulateurs des précipitations à la surface du globe.

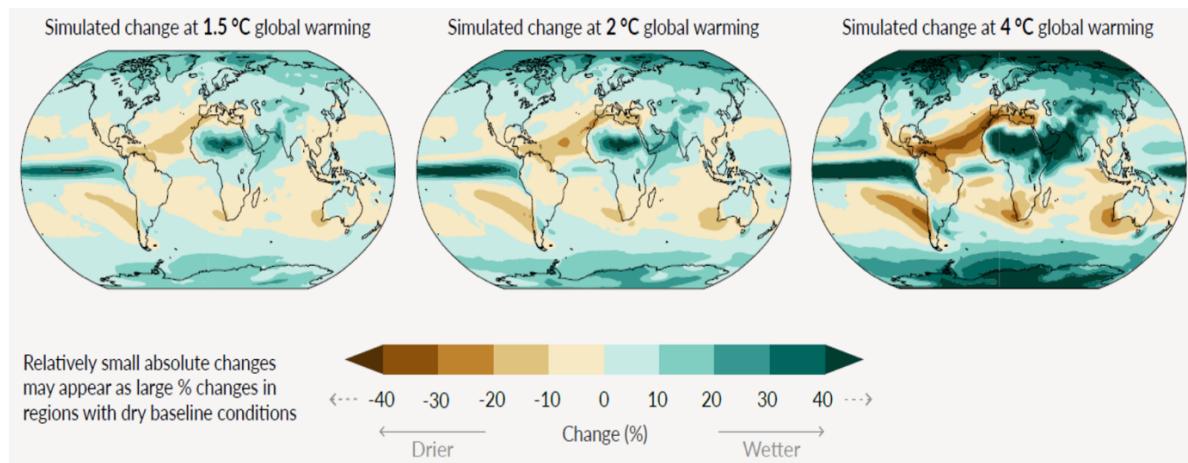
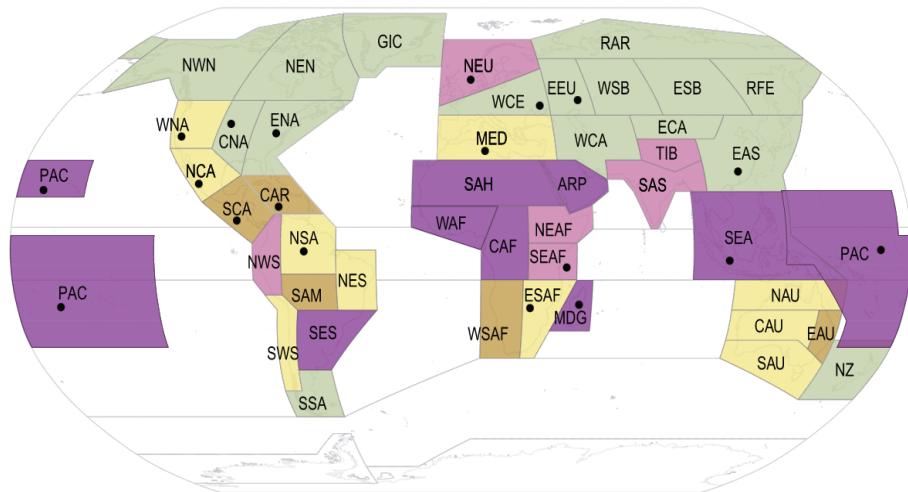


Figure 27 : Simulation de l'évolution des précipitations mondiales annuelles en fonction de scénarios d'augmentation de la température moyenne annuelle globale à +1,5°C (gauche), à +2°C (centre) et à +4°C (droite) par rapport à la période préindustrielle (54)

## f) Les phénomènes extrêmes

L'augmentation des températures va amplifier les phénomènes climatiques extrêmes en augmentant l'intensité et la fréquence des épisodes de chaleur extrême, des précipitations, des cyclones tropicaux, etc. La figure 28 illustre les principaux phénomènes extrêmes prévisibles avec le réchauffement climatique. On peut s'attendre à des évènements extrêmes de précipitations et de périodes sèches en Amérique du nord, en Europe centrale ainsi qu'en Asie. Cependant, l'Asie méridionale va connaître des conditions climatiques plus humides responsables de l'augmentation des risques d'inondations, comme en Afrique de l'est ou dans le nord de l'Europe. Ce changement climatique sera encore plus marqué en Afrique centrale et du nord (hors pourtour méditerranéen), dans l'océan Pacifique, et en particulier en Asie du sud-est où les moussons gagneront en intensité. A contrario, la fréquence, l'intensité et la durée des périodes de sécheresse devraient s'intensifier dans la région méditerranéenne, en

Amérique centrale, dans une grande partie de l'Amérique du sud et sur la côte ouest des Etats-Unis mais également en Afrique du sud et en Australie. Ces sécheresses seront responsables de grands feux de forêts comme cela s'est passé en Australie en 2021 (30,52).



- Plus chaud et plus sec
- Plus chaud et plus sec ; dans certaines régions événements extrêmes plus humides
- Événements extrêmes plus chauds et plus humides ; dans certaines régions plus de précipitations ou de situations sèches favorables aux feux de forêts
- Plus chaud et plus humide ; dans certaines régions plus d'inondations
- Plus chaud ; dans certaines régions événements extrêmes plus humides ou plus de précipitations
- Augmentation de l'intensité des cyclones tropicaux ou des vents violents

Figure 28 : Impact d'un réchauffement climatique mondial annuel moyen de +2°C par rapport à la période de référence climatologique (1960-2014) sur l'augmentation de la fréquence des événements climatiques extrêmes en fonction des régions du monde (52)

### 3. France métropolitaine

#### 3.1. Climat

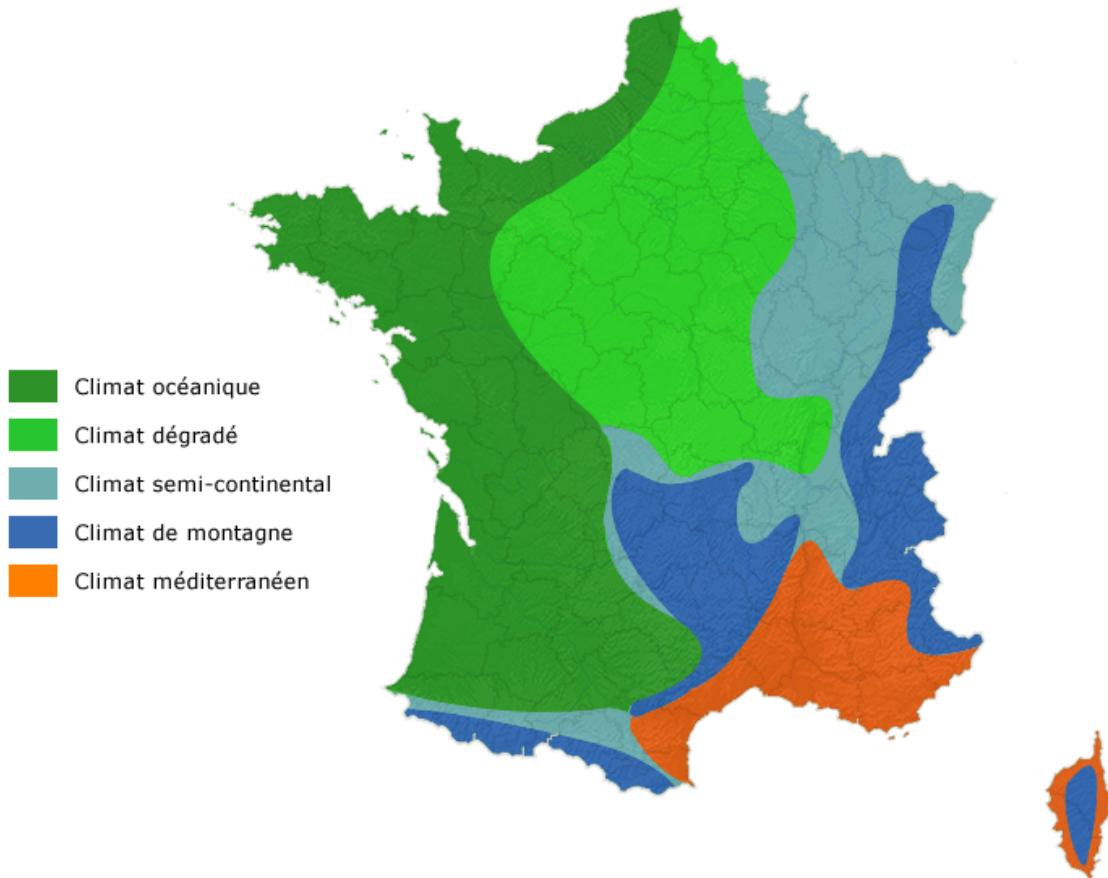


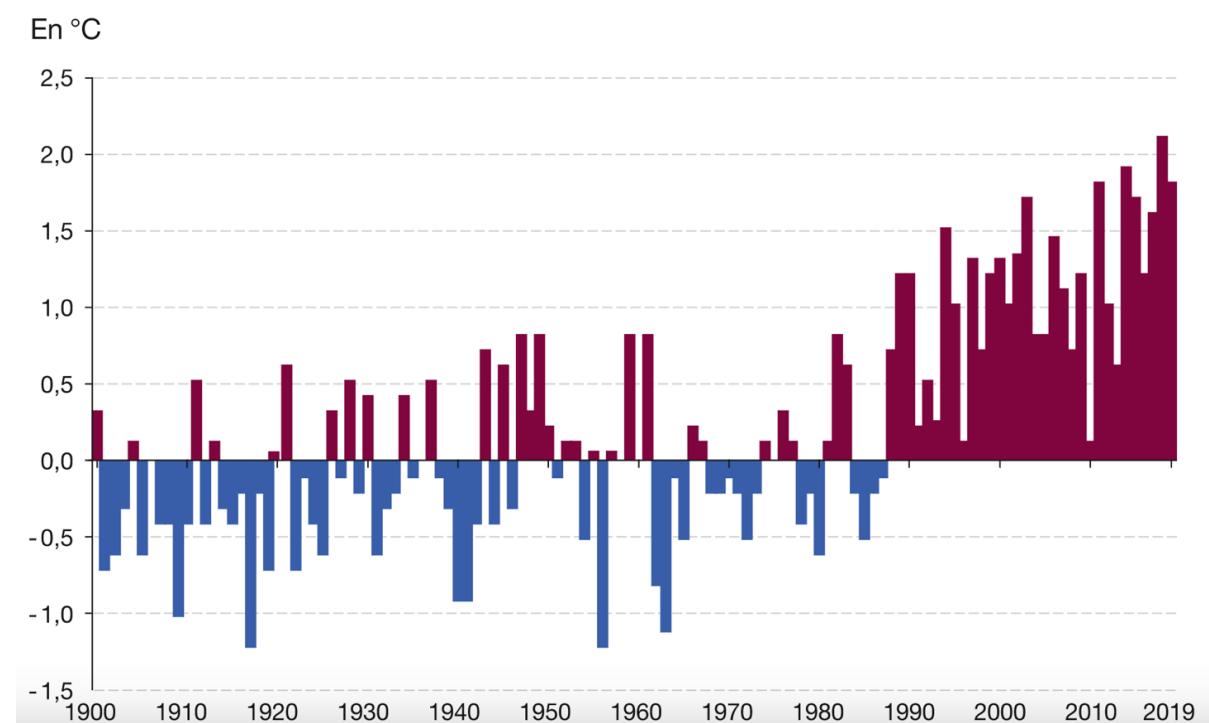
Figure 29: Les climats de la France métropolitaine (55)

La France est un pays dont le climat est tempéré comme de nombreux pays européens mais qui subit plus particulièrement l'influence océanique de l'Atlantique. Celle-ci assure à la France des hivers plus doux et des étés plus frais ainsi que des précipitations régulières tout au long de l'année. Sa géographie et sa géomorphologie explique cependant de grandes variations climatiques d'une région à l'autre (fig.29). Ainsi on distingue cinq grandes zones climatiques. Sur les côtes, au contact de l'océan Atlantique et de la Manche, on a le climat océanique. Au fur et à mesure que la distance par rapport au littoral augmente, l'influence océanique va progressivement s'atténuer jusqu'à retrouver un climat dit « dégradé ». Correspondant aux massifs montagneux comme le Massif central, les Alpes et les Pyrénées, nous avons le climat de montagne. Plus on prend de la hauteur et plus les conditions climatiques montagnardes vont s'accentuer. Le climat méditerranéen se situe dans le sud-est de la France, au bord de la mer méditerranéenne. Il est délimité par les 3 principaux reliefs montagneux. Enfin, dans l'est de la France, c'est le climat semi-continental.

## 3.2. Les variations climatiques

### 3.2.1. L'évolution des températures

Depuis le début du 20<sup>ème</sup> siècle en France, les températures moyennes annuelles augmentent à un rythme croissant (fig.30). Ce phénomène a pris de l'intensité à partir des années 1980 où des records de températures sont battus régulièrement. L'année 1986 est la dernière année dont la température moyenne annuelle était inférieure à la période de référence (1961-1990). Depuis l'année 1900, parmi les 10 années les plus chaudes 9 appartiennent aux 2 dernières décennies et 7 à la dernière décennie : 2020, 2018, 2014, 2019, 2011, 2015 et 2017 (56).



### 3.2.2. L'évolution future du niveau de la mer

L'augmentation du niveau de la mer devrait selon les scénarios du GIEC être comprise entre 28 et 102 cm d'ici 2100 (30). Le Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM) a élaboré une carte permettant en fonction des scénarios de montée des eaux de voir quelles côtes seraient exposées à la submersion maritime. La figure 31 représente un scénario de montée des eaux de 1 mètre. Elle met en évidence le fait qu'une grande partie des côtes françaises seraient impactées. On retrouve sur ces côtes de grandes villes comme Dunkerque et Calais dans le Nord-Pas-de-Calais, Le Havre en Normandie et secondairement Rouen qui profite d'un élargissement du bassin fluvial de la Seine. L'augmentation du niveau des eaux

impacterait également la ville de Caen, la baie des Veys et la baie du Mont Saint-Michel, une grande partie des côtes bretonnes avec les villes de Lorient et Vannes, Saint Nazaire en Loire-Atlantique et secondairement Nantes qui bénéficie d'un élargissement du bassin fluvial de la Loire. Les côtes vendéennes ainsi que charentaises seraient en grande partie immergées entraînant la quasi-disparition de la presqu'île de Noirmoutier, du Marais poitevin et l'immersion d'une partie de l'île de Ré et de la Rochelle. Plus au sud, le bassin de la Gironde s'élargirait pour recouvrir des zones à hautes densités de population comme une partie de Bordeaux et Libourne. Et plus au Sud, c'est le bassin fluvial de l'Adour qui menacerait des villes comme Bayonne. Cependant les côtes méditerranéennes ne seraient pas non plus épargnées avec l'avancée des eaux dans une grande partie du golfe du Lion entraînant la disparition du parc régional de Camargue et l'avancée des eaux en banlieue montpelliéraise.

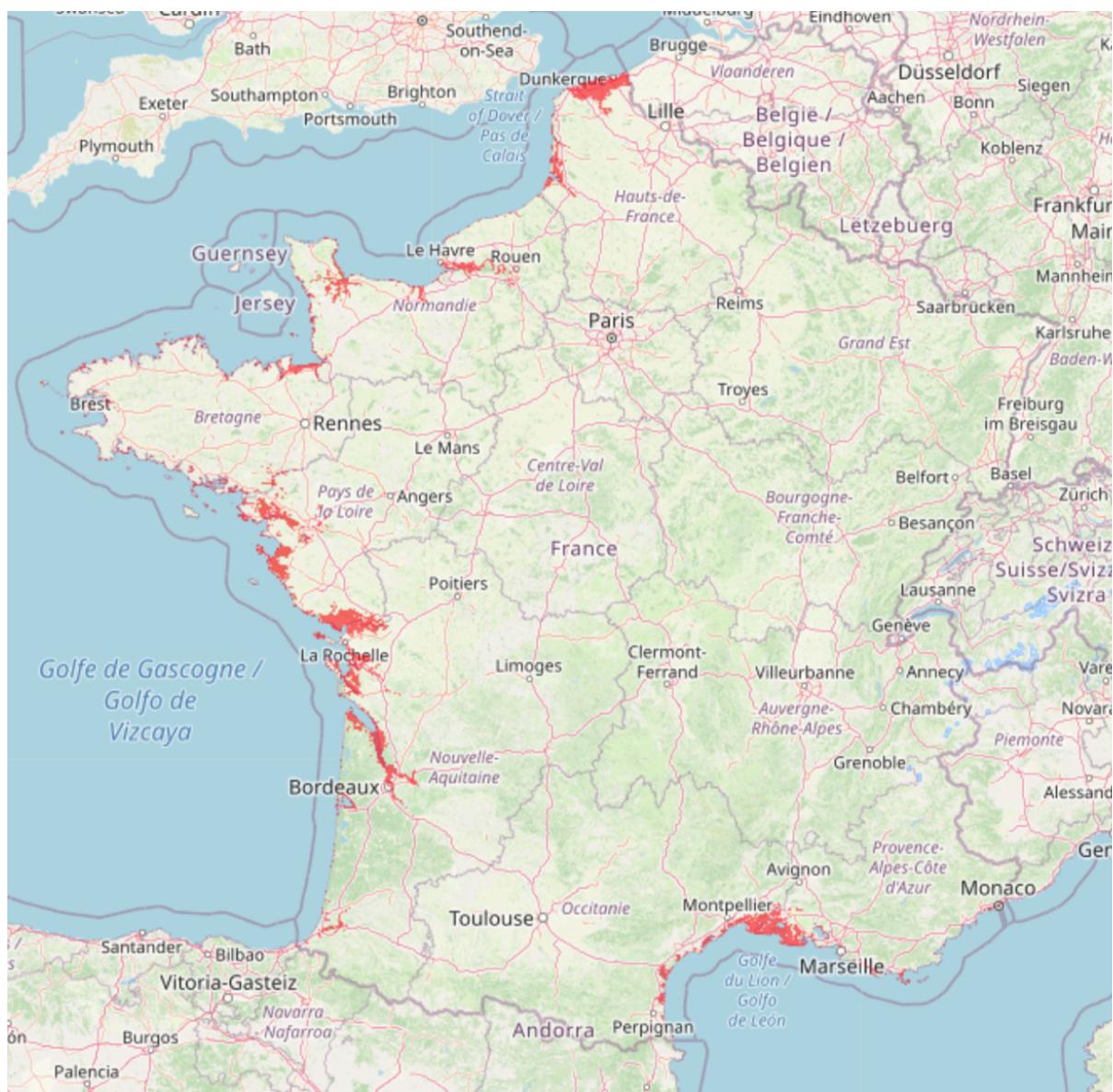


Figure 31: Carte des zones exposées à l'élévation du niveau des océans d'un mètre (à marée haute), élaborée par le BRGM (57)

A l'effet direct de la hausse du niveau des eaux s'ajoute un effet indirect qui est l'augmentation des phénomènes d'érosion qui dégradent les côtes malgré un phénomène antagoniste d'accrétion (58). Cette érosion détruit les digues naturelles exposant les terres intérieures à des évènements de fortes marées ou de tempêtes. Le centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (CEREMA) a créé une cartographie de l'érosion qui affecte les côtes françaises (fig.32) et a montré que 20% des côtes françaises sont en recul et 30 km<sup>2</sup> de terres ont disparu en 50 ans (59,60). Une grande disparité a également été montrée entre les différentes régions.

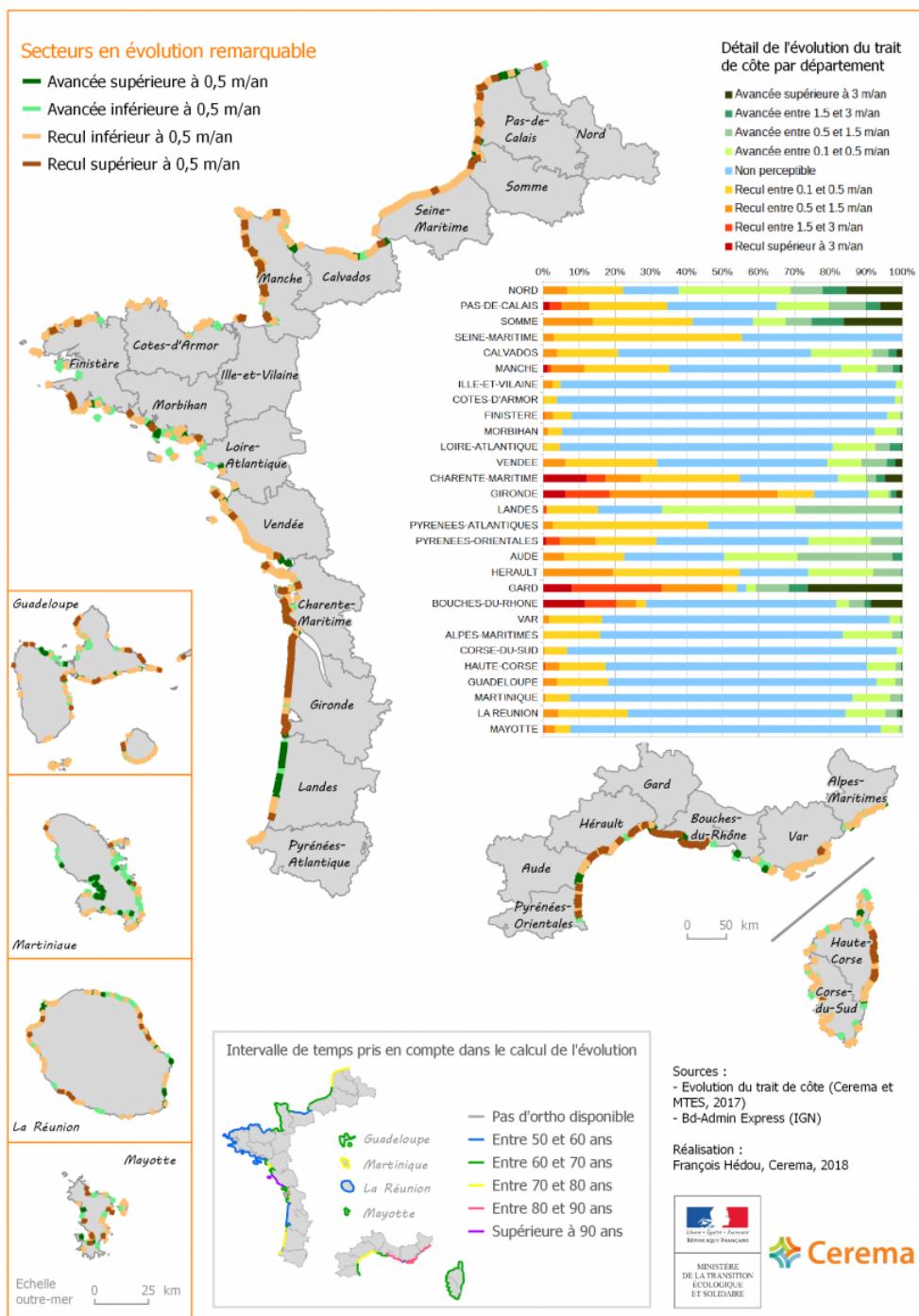


Figure 32 : Cartographie de l'indicateur national de l'érosion côtière (60)

### 3.2.3. L'évolution des glaciers métropolitains français

L'évolution de l'épaisseur des glaciers dépend de 2 phénomènes : Les précipitations neigeuses en hiver et la fonte des glaciers en été. Ils ont 2 effets opposés et c'est leur résultante qui détermine si le glacier s'agrandit ou au contraire se réduit. En France, l'ONERC (Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique) a mesuré l'évolution de divers indicateurs comme l'épaisseur ou la longueur des glaciers pour suivre l'impact du réchauffement climatique sur la cryosphère. Entre 2001 et 2013, les glaciers métropolitains ont perdu en moyenne 18,8 mètres d'équivalent d'eau (61).

Cette décroissance débute aux années 2000 et ne cesse de s'amplifier pour les glaciers alpins et pyrénéens (fig.33).

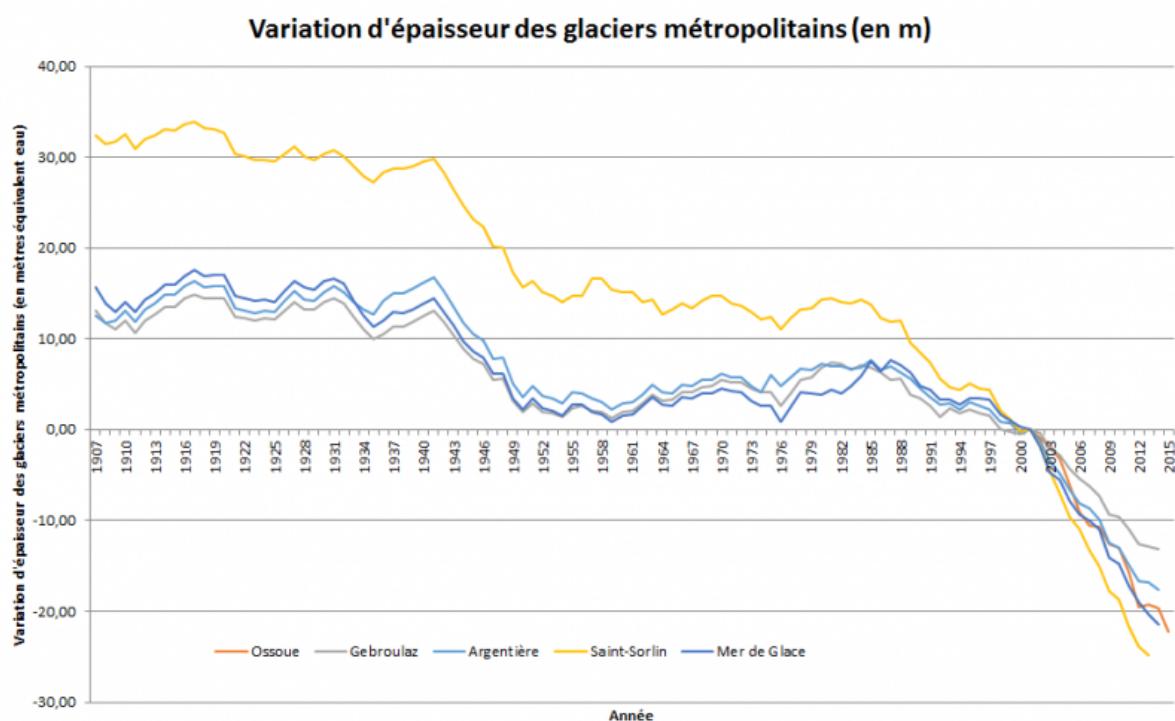


Figure 33: Variation dans l'épaisseur des glaciers métropolitains (en m) de 1907 à 2015 (52)

L'un des glaciers faisant référence en France est celui de l'Ossoue dans les Pyrénées. La figure 34 met en évidence que depuis 2001 ce glacier ne cesse de se retirer (sauf durant l'hiver de 2012 à 2013). Cela représente une perte d'épaisseur de 30 mètres, une diminution de sa superficie de 26 hectares (passage de 58 à 32 hectares) et un retrait de son front de 125 mètres entre 2001 et 2019. La disparition de ce glacier est prévue d'ici 2050. Le cas d'Ossoue est le témoin de ce qui se passe sur l'ensemble de la cryosphère métropolitaine.

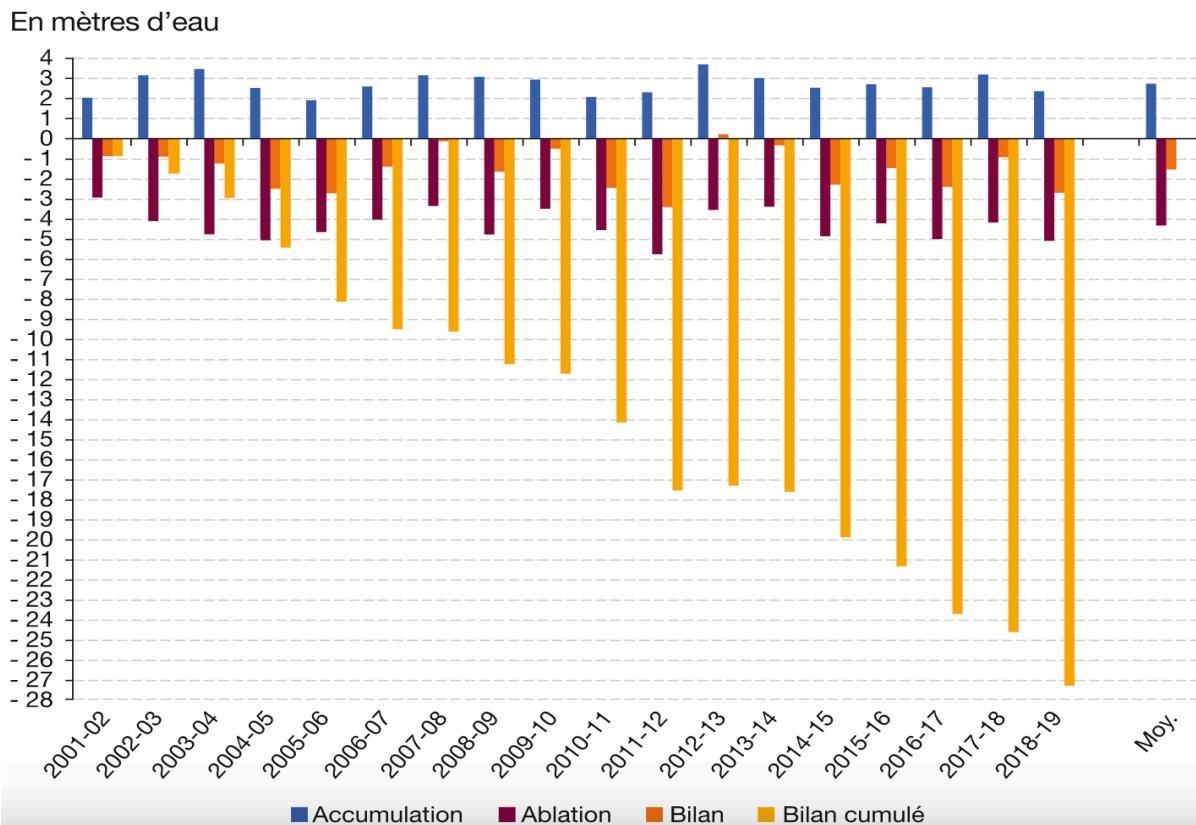


Figure 34: Variations de l'eau en mètres du glacier d'Ossoue depuis 2001 (52)

### 3.2.4. L'évolution des précipitations

En ce qui concerne l'évolution des précipitations en France, il est difficile de définir aujourd'hui leur répartition future sur tout le territoire. Il est cependant probable que l'on assiste à un assèchement dans le sud de la France avec un climat méditerranéen qui s'étendra plus vers le nord et des précipitations annuelles qui devraient augmenter sur le reste de la France. De plus, les périodes estivales sans pluies devraient s'allonger.

### 3.2.5. Les phénomènes extrêmes

Comme nous l'avons précédemment abordé, les émissions de gaz à effet de serre impactent directement le bilan radiatif et donc la température atmosphérique. Depuis 1947, MétéoFrance recense le nombre de vagues de chaleur et note une augmentation de leur occurrence. Sur les 41 vagues de chaleurs recensées depuis 1947, 32 ont eu lieu entre 1989 et 2019 soit un facteur 3 par rapport à la période 1947-1989. Alors que leur fréquence était de l'ordre de 5 ans en moyenne avant 1989 elle est devenue annuelle (62). Dans tous les scénarios étudiés par le GIEC, le réchauffement de la Terre devrait se poursuivre au moins jusqu'en 2050. MétéoFrance s'attend à un doublement de la fréquence des vagues de chaleur d'ici la moitié du siècle. La durée ainsi que l'intensité de ces évènements devraient s'accentuer

au cours du siècle. Depuis le début du 21<sup>ème</sup> siècle, on observe un doublement de la moyenne des records de chaleur ainsi qu'une diminution de la moyenne des records de froid par rapport à la normale. La période annuelle de leur survenue devrait s'étendre de fin mai à début octobre d'ici la fin du siècle. Ces modifications climatiques vont être à l'origine de l'augmentation de l'occurrence des périodes de sécheresse qui associées aux fortes températures entraîneront également l'augmentation de l'occurrence des incendies (fig.35). On peut y voir dans le cas d'un scénario où les émissions de CO<sub>2</sub> se stabiliseraient avant la fin du XXI<sup>ème</sup> siècle (scénario A1B proche du scénario RCP6 faisant l'hypothèse d'une augmentation du forçage radiatif de 6 W.m<sup>-2</sup>) que le nombre de jours de risque de survenue d'incendie augmenterait dans une grande partie de la France, en particulier dans le sud-est (63).

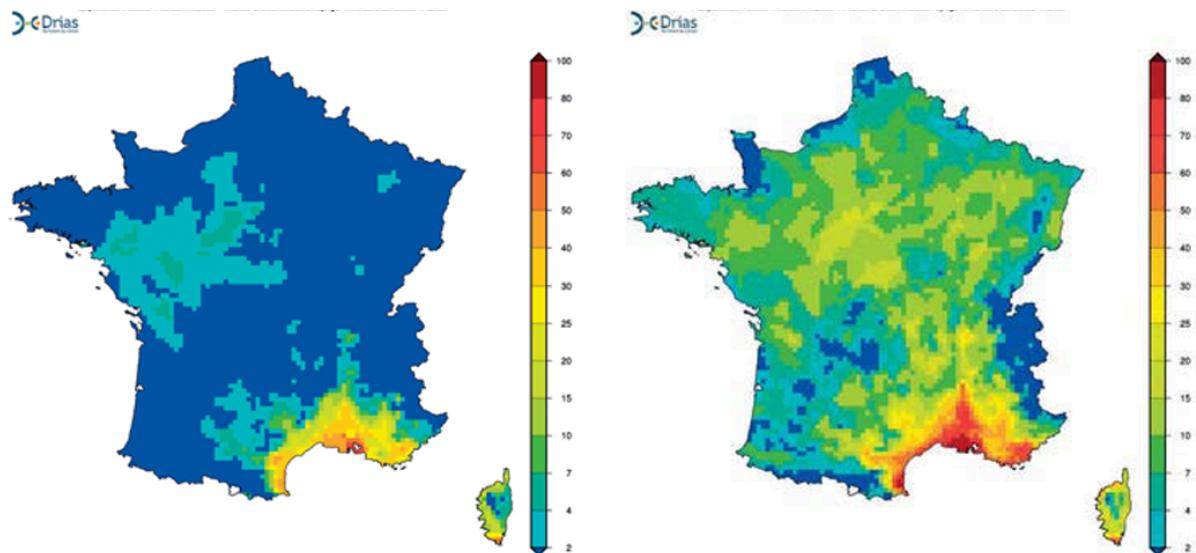


Figure 35: Nombre moyen de jour par an dont l'indice forêt météo (IFM) est supérieur à 40 pour la période 1961-1980 (carte de gauche) et d'ici 2060 (carte de droite) selon le scénario A1B (63). L'IFM est une estimation du risque d'occurrence d'un feu de forêt.

MétéoFrance analyse également le risque de forts vents ainsi que de tempêtes sur le territoire français. Depuis 1980, aucune tendance fiable ne montre un quelconque lien entre le réchauffement climatique et l'intensité ou la fréquence de survenue des tempêtes sur le territoire métropolitain français (64). En ce qui concerne les phénomènes de précipitation extrêmes, leur fréquence ne devrait pas cesser d'augmenter sur la grande majorité du territoire dans les prochaines années. Cette augmentation sera plus ou moins marquée en fonction des scénarios envisagés (63,65). Ces fortes précipitations augmentent les risques de crues, d'inondations, de glissements de terrain dont les répercussions socio-économiques sont graves.

## PARTIE 2 : Le moustique tigre (*Aedes albopictus*), vecteur d'arboviroses

### 1. Le vecteur

#### 1.1. Position dans la classification phylogénétique

Le moustique tigre appartient aux métazoaires qui correspond à l'ancien **règne animal** (Animalia) qui vient du latin *animus* se traduisant par « esprit ». C'est un eucaryote pluricellulaire hétérotrophe dépourvu de paroi cellulaire (retrouvée dans le règne végétal). En tant qu'hétérotrophe, il ne peut pas effectuer par lui-même la synthèse de substances organiques, il se nourrit donc à partir d'autres êtres vivants.

Dans la classification phylogénétique, on le retrouve parmi les bilatériens, puis les protostomiens, les ecdysozoaires et les **euarthropodes**. Le mot arthropodes vient du grec *arthron* « articulation » et *podos* « pieds ». Il regroupe l'ensemble des animaux dont le corps est formé de sous-unités articulées appelées métamères et appendices, recouverts d'une cuticule rigide constituant le squelette externe (66). Cet exosquelette est constitué d'un polysaccharide, la chitine, polymère de N-acétylglucosamine.

Le groupe des euarthropodes est divisé en chélicérates et mandibulates. Le moustique appartient à ce dernier qui caractérise les euarthropodes possédant une paire de mandibules, c'est-à-dire des appendices à peu d'articles, aptes à être rapteurs, coupeurs ou broyeurs.

Il est rattaché au groupe des pancrustacés, et plus précisément des hexapodes qui correspondent aux insectes (67). En tant qu'hexapode, il possède 6 pattes réparties en 3 segments sur le thorax. Il présente également un abdomen, lui-même segmenté en 3 parties, sans appendice locomoteur. On y retrouve les organes tels que l'estomac, les organes génitaux, les intestins, etc. Concernant la tête, celle-ci porte les mandibules et les antennes.

Les premiers insectes seraient apparus au Silurien inférieur (440 Ma) mais le plus ancien fossile vient d'Ecosse et date du Dévonien inférieur (410 Ma). Le groupe des insectes aurait connu une croissance exponentielle dû notamment à leur exosquelette en chitine les protégeant des déperditions d'eau et leur permettant ainsi de coloniser le milieu terrestre. La dureté de l'exosquelette a également été une protection efficace contre les prédateurs (68).

Le moustique appartient aux holométaboles, ce qui veut dire qu'il subit une métamorphose complète au cours de leur développement. La larve est très différente de l'adulte (ou imago). Entre les deux, il y a la pupaison, au cours de laquelle, par une étonnante métamorphose, l'animal remodèle complètement l'organisation de son corps pour accéder à la forme imaginaire ou adulte correspondant à la forme ailée propice à la reproduction (69).

Enfin, le moustique appartient aux **diptères**, insectes possédant une simple paire d'ailes d'où le nom du taxon. Les pattes, utilisées pour la marche, sont très allongées. L'ancêtre des Diptères serait apparu sur Terre lors du Permien entre 286 et 245 Ma. Il aurait été au départ tétrapète puis aurait perdu une paire d'ailes au début du Trias entre 245 et 208 Ma. Le caractère hématophage de ces insectes remontrait au Jurassique / Crétacé il y a 208 à 65 Ma (70).

Plusieurs genres de moustiques existent. Parmi ceux impliqués dans les maladies humaines, il y a le genre *Anopheles* impliqué dans le paludisme, le genre *Culex* dans la fièvre du Nil occidental et diverses encéphalites et *Aedes* vecteur de la dengue et de la fièvre jaune. Le plus vieux fossile date de 95 Ma. En 2013 une équipe d'entomologistes américains a retrouvé un fossile de moustique gorgé de sang remontant à 46 Ma (70,71).

Le moustique tigre appartient au **genre *Aedes*** et à **l'espèce *albopictus*** signifiant « points blancs ». Il présente effectivement des rayures blanches en pointillés sur le corps d'où son nom de tigre. Il est important de noter que selon la nouvelle classification, sa dénomination est devenue *Stegomyia albopicta*. Elle est cependant très peu utilisée ce qui explique le choix d'utiliser la dénomination *Aedes albopictus* dans cette thèse.

## 1.2. Caractéristiques physiques et biologiques d'*Aedes albopictus*

Les figures choisies dans cette sous-partie ne représentent pas systématiquement *Aedes albopictus* mais servent à illustrer le texte qui abordent spécifiquement cette espèce. Ce choix a été fait face à la difficulté de trouver des illustrations de bonne qualité.

### 1.2.1. Description morphologique de l'œuf

L'œuf d'*Aedes albopictus* a une forme fusiforme et mesure environ 1mm de long (72). Lors de la ponte l'œuf est de couleur blanche mais par des phénomènes d'oxydation, la couche extérieure va se colorer jusqu'à devenir grise/noire dans les heures qui suivent. Il va être composé de l'intérieur vers l'extérieur de l'embryon, de la membrane vitelline pellucide, de l'endochorion formant une couche épaisse puis de l'exochorion formant une couche fine (73).

### 1.2.2. Description morphologique de la larve

Les larves des moustiques sont constituées de 3 parties : tête, thorax et abdomen qui vont évoluer au cours de 4 stades larvaires de L1 à L4 (fig.36) (73,74).



Figure 36: Morphologie générale d'une larve de *Culicinae* (*Culex*) (73)

#### La tête

La tête est constituée de 3 plaques chitineuses formant une capsule sur laquelle repose les pièces buccales. Ces dernières vont avoir une activité broyeuse que l'on va retrouver tout au long du cycle. Les mandibules placées en position centrale vont jouer un rôle de préhension

notamment grâce aux longues soies recourbées qui vont permettre de capturer les nutriments présents dans l'eau. Les antennes en position latérale sont longues, spéculées et reconnaissables par la présence d'importantes touffes de soies.

### Le thorax

Le thorax ne possède pas à ce stade d'appendice. Il est théoriquement composé du prothorax, du mésothorax et du métathorax mais qui sont à ce stade difficilement reconnaissables. Cette segmentation peut se deviner grâce à la disposition de groupes de soies arrangées en éventail.

### L'abdomen

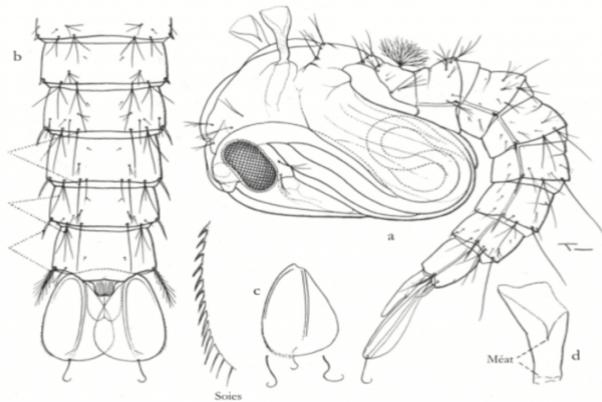
L'abdomen beaucoup plus souple que le thorax va permettre le déplacement. Il est composé de 9 segments dont le huitième abrite le siphon respiratoire permettant à la larve aquatique de respirer l'air à la surface de l'eau tout en restant immergée.

#### **1.2.3. Description morphologique de la nymphe**

Lors du passage du stade larve au stade nymphe, le moustique tigre subit une métamorphose importante au cours de laquelle 4 transformations principales vont se réaliser (fig.37) (72–75) :

- La démarcation entre la tête et le thorax disparaît pour former un céphalothorax volumineux prolongé par un abdomen composé de 10 segments. A l'extrémité de l'abdomen se situent les 2 palettes natatoires.
- La mobilité de la nymphe est permise grâce à la contraction rapide des muscles de l'abdomen qui fonctionnent en synergie avec l'activité stabilisatrice des 2 palettes natatoires. Ainsi, la larve peut fuir en cas d'attaque de prédateurs.
- Le siphon respiratoire disparaît de l'extrémité de l'abdomen, remplacé par 2 trompettes respiratoires situées sur le céphalothorax. Elles permettent à la nymphe de pouvoir respirer l'air tout en étant dans l'eau comme au stade larvaire.

La nymphe ne va pas s'alimenter durant toute cette phase et va donc puiser dans ses réserves accumulées au cours du stade précédent.



#### 1.2.4. Description morphologique de l'adulte (de l'imago)

L'anatomie de l'imago présente comme la larve 3 parties : tête, thorax et abdomen (fig.38) (72–75).

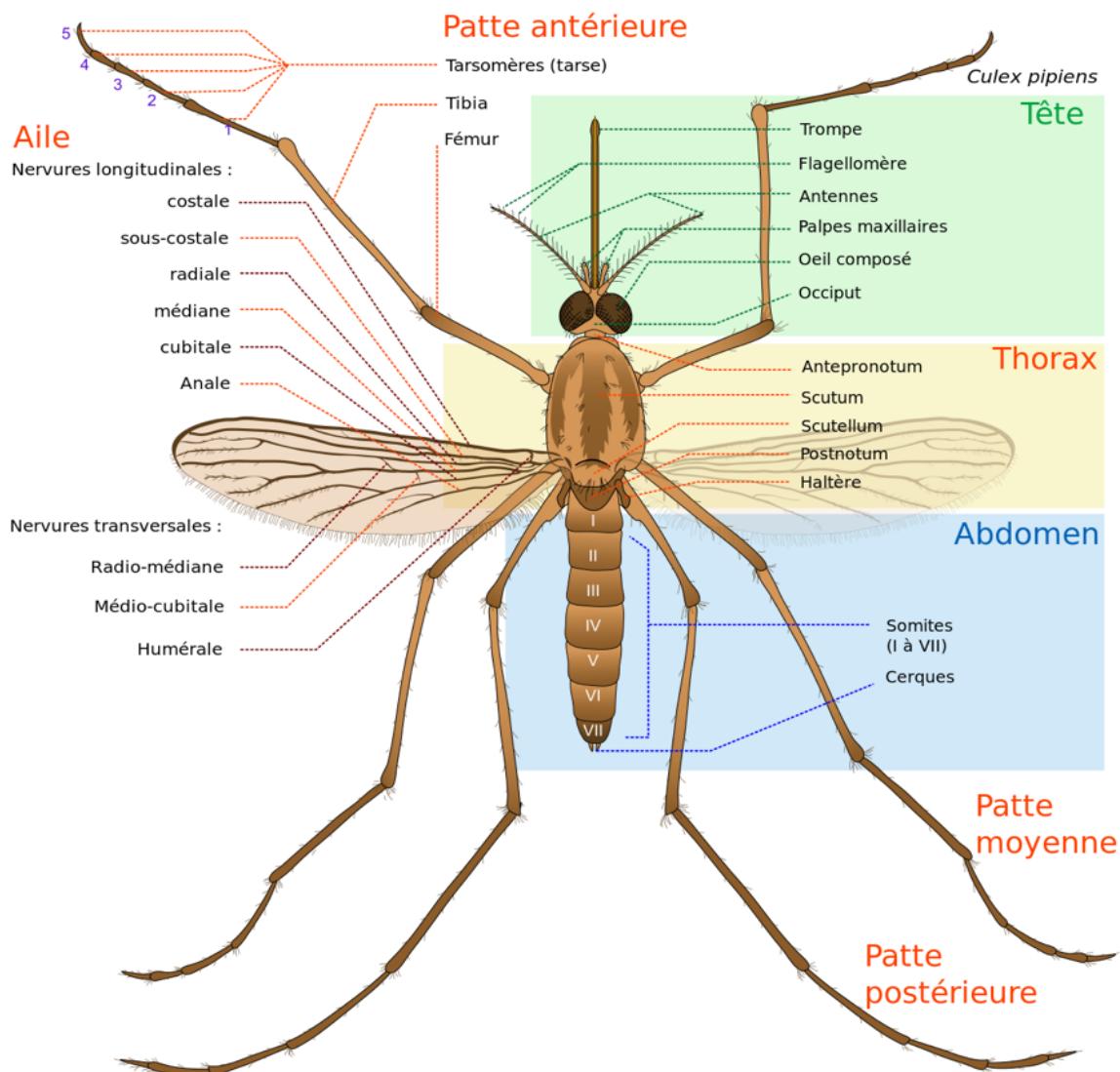


Figure 38: Anatomie du stade imago (adulte) du moustique *Culex pipiens* (76)

## Tête

La tête du moustique est une sphère irrégulière composée de différentes pièces toutes unies les unes aux autres. Les organes qui la composent sont les yeux, les antennes et la trompe (fig.39). Les yeux sont composés d'ommatidies, unités optiques élémentaires caractéristiques des arthropodes. Ils occupent la plus grande partie de la tête et sont situés en position latérale.

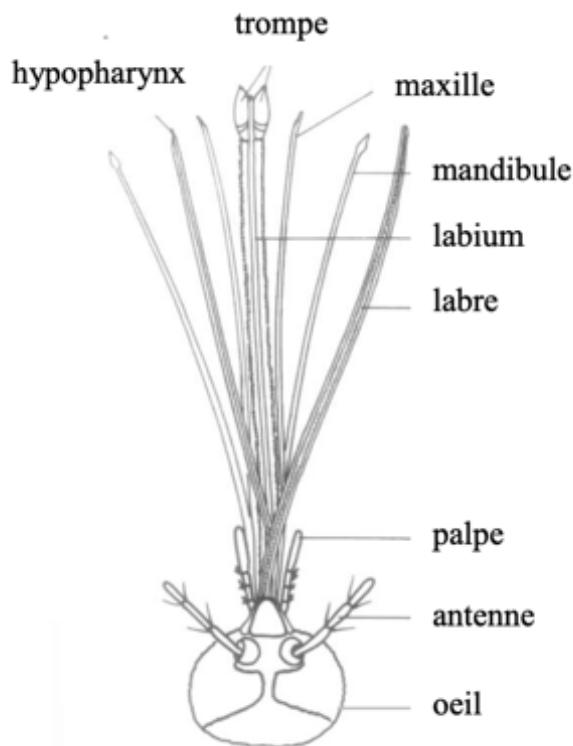


Figure 39: Anatomie de la tête du moustique adulte (77)

On retrouve également une paire d'antennes qui a une importance particulière dans la différenciation du mâle et de la femelle grâce à un fort dimorphisme sexuel. C'est également une caractéristique majeure pour déterminer à l'œil nu le genre auquel appartient le moustique (fig.40).

Chez le mâle, les antennes vont être « plumeuses » avec de longues verticilles de soie. Elles confèrent au mâle d'importantes capacités d'olfaction pour percevoir les phéromones émises par les femelles et d'audition pour détecter certaines fréquences de vibrations (74,78). Chez la femelle, les antennes vont être plutôt glabres avec des verticilles de soie plus courtes formant un réseau beaucoup moins dense. Elles sont le support de nombreux chémorécepteurs jouant un rôle dans la recherche d'une proie pour le repas sanguin. Une paire de palpes maxillaires situés de part en part de la trompe, porte des récepteurs de différents types : chémorécepteurs, mécanorécepteurs et thermorécepteurs, ce qui contribue

avec les antennes à la détection efficace de l'hôte ainsi qu'aux comportements à médiation sensorielle (79).

Comme pour les antennes, la trompe présente un dimorphisme important entre le mâle et la femelle. Le mâle possède un appareil buccal de type suceur afin qu'il se nourrisse de nectar de fleur, de sève de plantes tandis que la femelle possède un appareil buccal de type vulnérant lui permettant de traverser les téguments de l'hôte mammifère et de se gorger du sang de l'hôte. Contrairement au mâle, ce sont les femelles qui sont hématophages, leur trompe joue donc un rôle déterminant dans le risque de transmission de pathogènes.

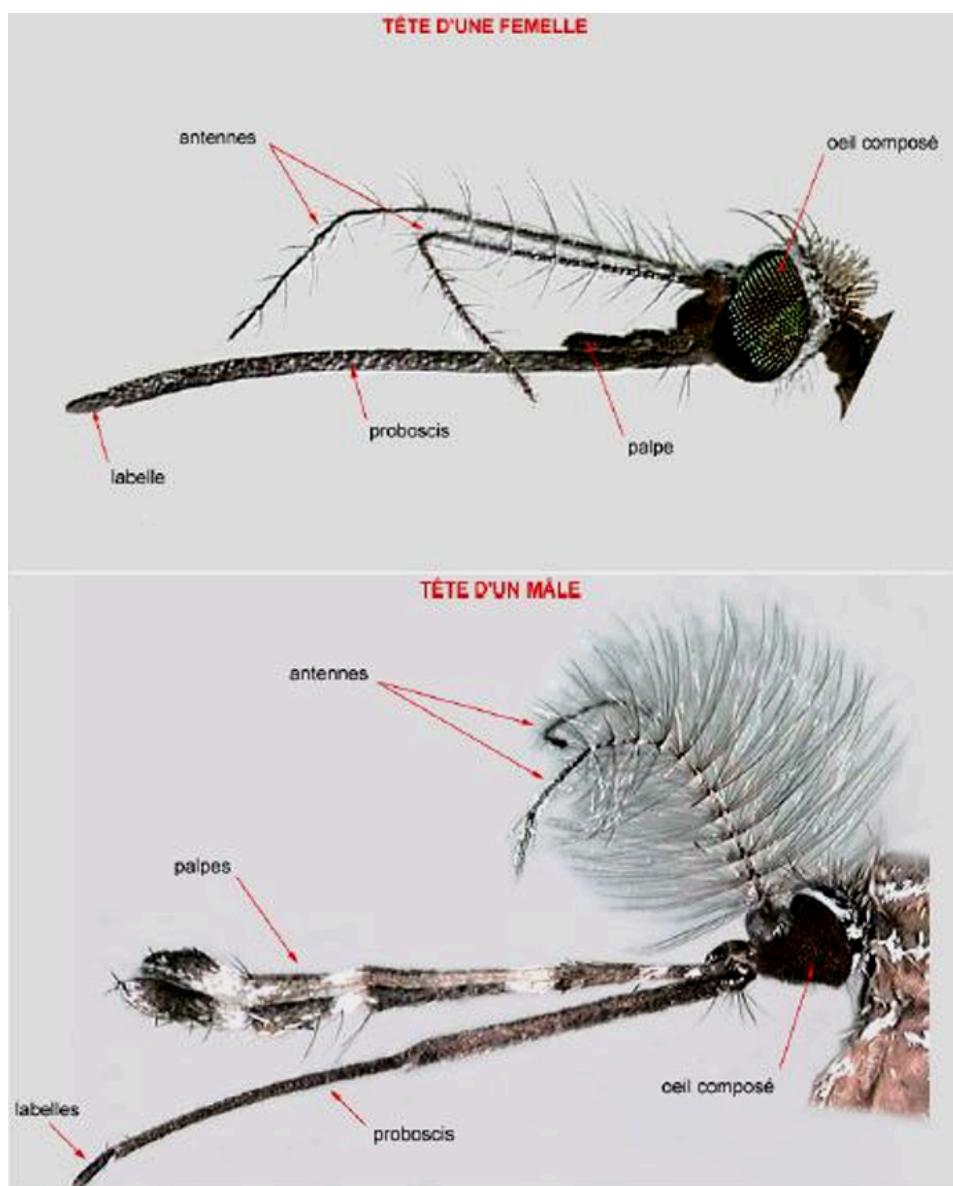


Figure 40: Dimorphisme sexuel entre le moustique mâle et femelle (*Aedes albopictus*) (80)

La trompe n'est pas un organe simple, elle est constituée de plusieurs parties. Le labium est une gaine souple en forme de gouttière qui va accueillir et protéger l'ensemble des 6 autres

pièces buccales appelées stylets (fig.41). Lors de la piqûre, il va se courber sans pénétrer la peau. Puis les **maxillaires**, fines lames possédant à leur extrémité des dents tranchantes, vont cisailler l'épiderme, agissant tel un scalpel. Les **mandibules**, également en forme de lame mais non-dentées, vont séparer progressivement les deux bords de l'épiderme cisaillé, servant ainsi d'écarteurs. Le **labrum**, aussi appelé épipharynx, est un organe en forme de gouttière qui en s'associant à l'**hypopharynx**, organe comportant un canal salivaire, vont constituer le canal alimentaire du moustique (81,82). Celui-ci achemine le sang de l'hôte (ou un liquide sucré) vers le tube digestif du moustique. Le canal salivaire libère une salive qui aura plusieurs effets : anticoagulant pour maintenir la fluidité du sang de l'hôte, vasodilatateur pour faciliter l'aspiration, immunosupresseur pour se défendre de l'hôte et lubrifiant pour que la trompe coulisse au mieux.

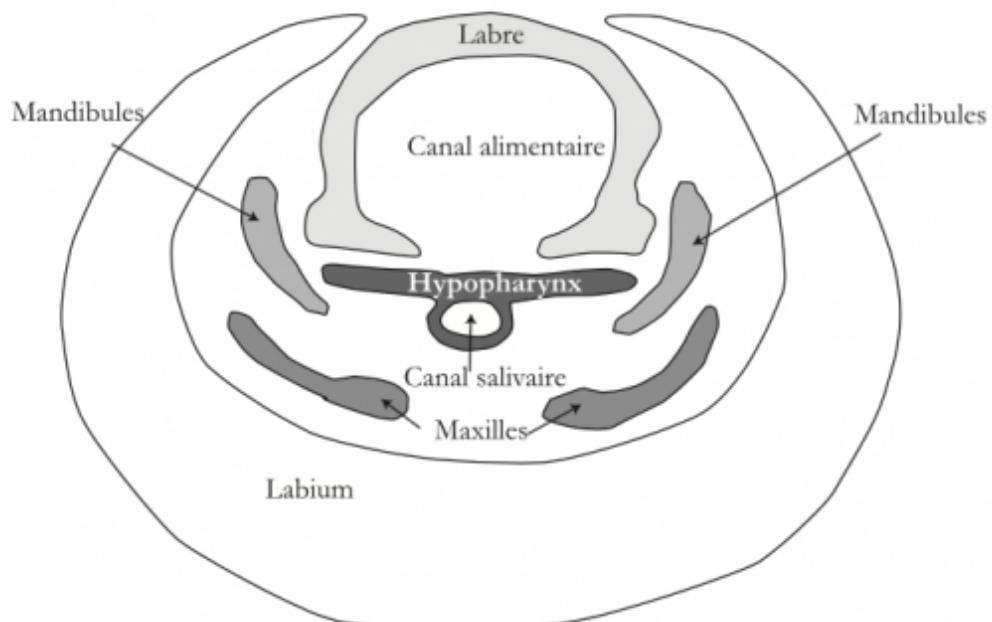


Figure 41 : Coupe de l'organe suceur du moustique tigre (*Aedes albopictus*) femelle (74)

## Thorax

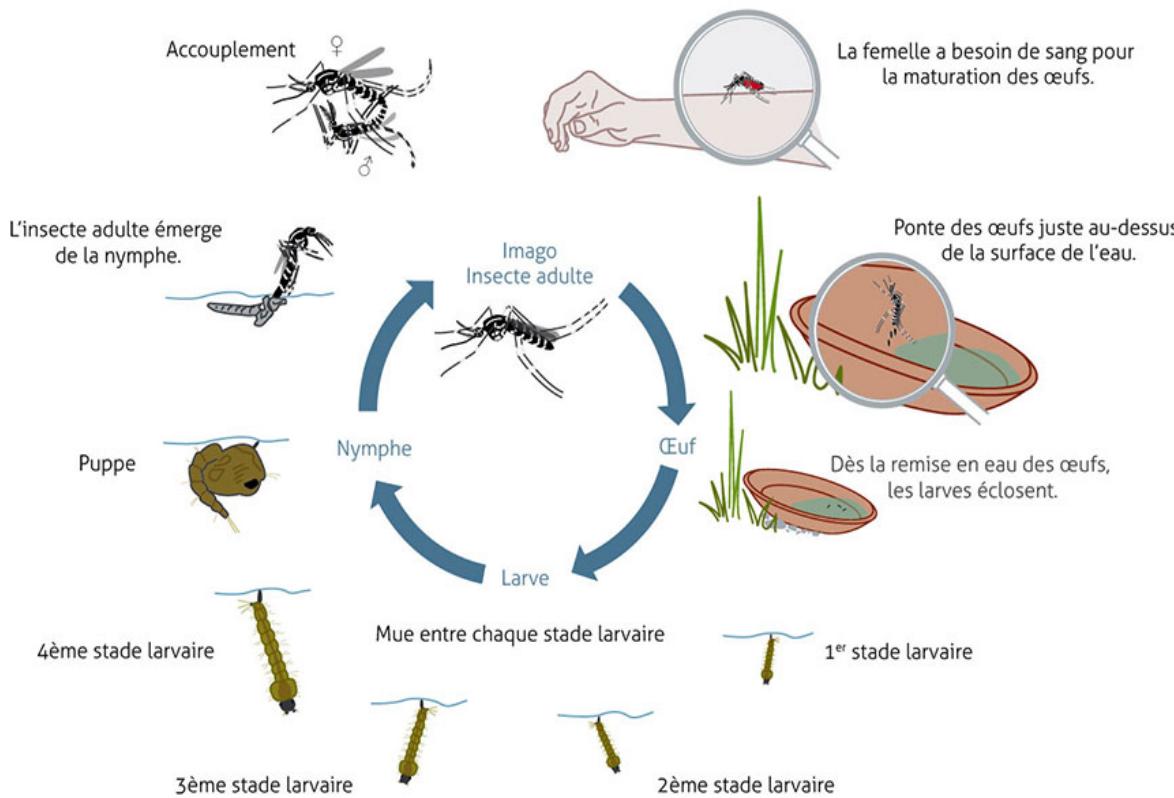
Le thorax est segmenté en 3 parties de taille et de forme différentes appelées : le pro-, le méso- et le métathorax. Chaque segment possède une paire de pattes en position ventrale. Les ailes sont fixées sur le mésothorax qui est le segment possédant la fonction alaire. Il abrite l'ensemble de la musculature assurant le mouvement des ailes ce qui explique que ce segment ait la taille la plus importante. Le métathorax va quant à lui assurer un rôle d'équilibration lors du vol grâce à une paire d'haltères. Par ailleurs, deux paires de stigmates situées en position latérale sur le thorax vont permettre la fonction respiratoire.

## Abdomen

L'abdomen est divisé en 10 segments qui sont pour la plupart composés de deux plaques, une ventrale et une dorsale qui vont pouvoir coulisser les unes sur les autres pour permettre à l'abdomen d'agrandir son volume lors du repas sanguin pour l'oogenèse. Les stigmates respiratoires vont déboucher au niveau des membranes reliant chacune des plaques composant les segments de l'abdomen.

## 1.3. Cycle de développement

Le cycle de vie d'*Aedes albopictus* se déroule en deux phases avec 4 principaux stades. On retrouvera la phase pré-imaginale qui se déroule en milieu aquatique et qui correspond aux stades de l'œuf, de la larve et de la nymphe puis la phase imaginaire qui concerne l'imago (l'adulte) se déroulant en milieux terrestre et aérien (fig.42).



© Biogents, I. Schleip

Figure 42: Cycle de vie du moustique tigre (*Aedes albopictus*) (83)

### 1.3.1. Stade de l'œuf

La femelle dépose ses œufs sur des surfaces humides proches de l'eau. L'œuf ne poursuivra son développement qu'une fois en contact direct avec l'eau qui se produira grâce à des phénomènes environnementaux (précipitations, inondations, etc.) ou grâce aux activités humaines (stockage d'eau de pluie, arrosage, etc.). Cette faculté couplée à une forte résistance de l'œuf à la dessiccation lui permet de survivre hors de l'eau pendant plusieurs mois ce qui facilite sa dispersion. C'est ainsi que des œufs de moustique ont pu être transportés sur de longues distances grâce aux activités humaines de transfert (réservoirs, containers, pneus, etc.). De plus, en pondant ses œufs dans différents gîtes, la femelle multiplie les possibilités pour ses œufs de se retrouver dans des conditions propices à leur développement.

En climat tempéré, les œufs sont également capables d'entrer en dormance. Celle-ci appelée diapause correspond à un arrêt momentané du développement de l'œuf lorsque à l'automne la photopériode et la température passent respectivement en-dessous de 11 heures et de 10°C (75). Ainsi les œufs passeront l'hiver pour reprendre leur développement au printemps. Ils pourront ainsi résister à des températures voisines de 0°C voire en-dessous.

Une fois que les conditions deviennent favorables, les embryons éclosent en 2 à 3 jours. Le nombre d'œufs pondus par une femelle est de l'ordre de plusieurs dizaines à plusieurs centaines par ponte. La fécondité d'une femelle est de l'ordre de 800 à 2500 œufs (80).

Ces caractéristiques font du stade de l'œuf un stade clé dans la colonisation de nouveaux territoires par le moustique tigre.

### **1.3.2. Stade de larve**

La phase larvaire dure généralement 4 à 8 jours mais peut s'étendre sur plusieurs semaines si les températures restent basses, si l'alimentation dans le gîte larvaire se fait rare, si la densité de larves est importante. La larve va se placer perpendiculairement à la surface de l'eau, la tête orientée vers le bas et l'abdomen orienté vers la surface pour que le siphon respiratoire soit au contact de l'air. En effet, bien que la larve de moustique soit aquatique, elle n'est pas dotée de branchies et donc incapable de respirer dans l'eau.

La larve se déplace de manière verticale en se repliant en forme de « S » et en se dépliant brutalement (72). Ce déplacement va être nécessaire pour lui permettre de respirer en surface et pour pouvoir se nourrir en plongeant pour brouter les nutriments situés au fond du gîte larvaire. Elle peut également se nourrir grâce à un mouvement en « houppe » de ses brosses mandibulaires qui vont ainsi filtrer en continu l'eau pour récupérer des nutriments.

Lors du stade larvaire, la larve va passer par 4 stades de L1 à L4 durant lesquels elle va accroître sa taille par mues successives passant de 2 mm à 12 mm. Les larves sont sensibles à la dessiccation et aux variations climatiques importantes. Ainsi la phase larvaire va être une période critique dans le développement des moustiques (72).

### 1.3.3. Stade de nymphe

La nymphe est l'ultime étape de la phase dite pré-imaginale (phase précédent l'apparition de l'imago) et dure en général 3 à 4 jours. C'est une phase de transition permettant le passage du moustique du milieu aquatique au milieu terrestre et aérien. Cette phase va être essentiellement marquée par un état de léthargie (pupe) afin de concentrer le maximum d'énergie pour les grandes métamorphoses qui vont permettre d'accéder au stade adulte.

### 1.3.4. Stade adulte

L'insecte adulte ou imago émerge de la nymphe et quitte le milieu aquatique dans le but de se reproduire. La femelle va lors du vol produire un sifflement dont la fréquence fait entrer en résonance les soies des palpes du moustique mâle. Par ce moyen, le moustique mâle est attiré par ce son. Lors de la reproduction, la femelle va conserver le sperme du mâle dans une banque qui lui permet de pouvoir féconder plusieurs portées d'embryons à partir d'un même accouplement. Le cycle trophogonique d'*Aedes albopictus*, c'est-à-dire la période entre le repas sanguin et la ponte est d'une durée approximative de 3 jours. Or, la femelle moustique vivant une trentaine de jours, elle va pouvoir pondre à 7-8 reprises au cours de sa vie.

Le mâle n'étant pas hématophage, il se nourrit de sucs d'origine végétale comme la sève ou encore le nectar des fleurs. Ceci explique que le mâle reste en général dans une zone géographique proche de son gîte d'émergence. D'un point de vue épidémiologique, le rôle du moustique mâle se limite à la reproduction.

La femelle peut également se nourrir de sucs issus du monde végétal mais va, pour la plupart des espèces, suivre un régime hématophage. Le sang digéré va permettre d'assurer non seulement la nutrition du moustique femelle mais également le développement des œufs. Pour *Aedes albopictus*, le repas sanguin va nécessairement conditionner la ponte. Etant une espèce très opportuniste, elle est capable de piquer de nombreuses espèces de vertébrés comme des mammifères, des oiseaux, des amphibiens. Cette capacité explique l'énorme potentiel de transmission d'un grand nombre d'agents pathogènes à l'origine de ce que l'on appelle les arboviroses, c'est-à-dire les maladies dues à des virus transmis aux humains par des arthropodes hématophages (moustiques, tiques, phlébotomes) à partir d'un réservoir animal ou d'un individu infecté (« Arthropod-borne virus »). On peut citer par exemple l'encéphalite de Saint-Louis mais il existe un grand nombre d'autres maladies.

La femelle d'*Aedes albopictus* est anthropophile c'est-à-dire qu'elle affectionne les humains comme hôtes pour son repas sanguin. Elle est dite endophage et exophage selon que son repas sanguin est pris à l'intérieur ou à l'extérieur des habitations. Pour se nourrir, la femelle va se déplacer selon deux principes : actif, le moustique se déplace de plusieurs mètres à un kilomètre de son lieu de reproduction et passif, son déplacement se fait au gré du vent ou en empruntant les transports humains.

Une fois le repas sanguin effectué, la femelle va se réfugier dans un abri pour entrer en phase de repos durant laquelle les œufs vont subir une maturation. Une fois les œufs mûrs, la femelle sort de son abri en quête d'un lieu de ponte propice au développement de ses œufs.

## 1.4. Place dans la chaîne alimentaire

La consommation de nectar par le moustique fait de lui un pollinisateur important pour de nombreux écosystèmes. Il est notamment le principal pollinisateur de l'Arctique lors de la courte période propice à la végétation (84). Le lien ancestral qui existe entre le moustique et les plantes à fleurs est un exemple de coévolution. Dans une étude publiée en 2009, il est mis en évidence la corrélation entre l'apparition des angiospermes, plantes dont le nectar est source d'alimentation pour le moustique, et une importante diversification génétique des moustiques lors du Crétacé. Des écailles de moustiques datées du Crétacé moyen (il y a 100 à 94 millions d'années) ont été retrouvées dans des fossiles de fleurs (85).

Pour trouver leur source de nourriture, les moustiques se servent de leur sens olfactif. Certains des signaux olfactifs qui attirent les moustiques femelles vers les humains seraient également émis par certaines fleurs. Il se pourrait donc que l'attrait pour le repas sanguin soit le fruit d'un glissement évolutif de leur attrait initial pour certaines fleurs (84). Le rôle de pollinisateur est uniquement présent une fois le moustique devenu adulte car durant le stade larvaire, il se nourrit de microorganismes tels que des bactéries, des champignons microscopiques et des algues grâce à ses capacités de filtreur. A ce stade il va jouer un rôle indispensable dans les écosystèmes en servant de proie pour de nombreuses espèces aquatiques comme certains poissons, batraciens, oiseaux et insectes. La larve permet de rendre accessible la richesse alimentaire microscopique des sources d'eau en servant d'intermédiaires à d'autres animaux se nourrissant de proies macroscopiques.

Une fois devenu adulte, le moustique va quitter l'habitat aquatique pour rejoindre un écosystème terrestre. En mourant ou en étant mangé puis excrété, il va permettre de nourrir de nombreuses espèces animales puis végétales en enrichissant pour ces dernières le sol. Ceci conduit à un important transfert de biomasse c'est-à-dire le déplacement de nutriments et de matière vivante d'un écosystème vers un autre écosystème. A l'échelle du moustique, ce transfert de biomasse peut paraître négligeable mais à l'échelle d'une population ce phénomène devient important. Par exemple en Alaska, les biologistes estiment que l'ensemble des moustiques présents sur le territoire représenteraient 43 500 tonnes de biomasse soient l'équivalent de 400 000 caribous adultes (86). La place du moustique dans un écosystème est donc primordiale pour l'équilibre de celui-ci.

## 1.5. Compétence, capacité vectorielle et écologie du vecteur

### 1.5.1. Compétence vectorielle

*Aedes albopictus* est le vecteur de différentes arboviroses dont la dengue et le chikungunya. Selon l'institut Pasteur : « La compétence vectorielle d'une espèce de moustique est définie comme l'aptitude de celle-ci à permettre le développement d'un pathogène, son ingestion dans un repas sanguin, à sa maturation dans ses glandes salivaires, lui permettant alors de transmettre le pathogène à une prochaine proie » (87). La compétence vectorielle repose sur des facteurs intrinsèques dépendant du vecteur ou du pathogène. Ces facteurs sont d'ordres génétique, mécanique, physico-chimique, moléculaire, à l'exclusion des facteurs liés à l'environnement.

La compétence vectorielle va être le reflet du degré de coadaptation ou de compatibilité entre le vecteur et le pathogène. Elle évalue donc une relation entre ces 2 parties et peut varier lors de changement dans la population d'une des 2 parties. Ce système biologique repose en fait sur l'équilibre dynamique entre 2 espèces qui évoluent tout en restant interconnectées (88,89).

De par son opportunisme alimentaire, le moustique tigre se nourrit à partir de différentes espèces d'hôtes mammifères tels que l'homme, le chien, le rat et le chat. Ces repas sanguins mettent en contact le moustique avec de nombreux agents pathogènes ce qui augmente le risque de nouvelles coadaptations qui dans un deuxième temps, peuvent entraîner l'apparition de nouvelles maladies chez l'homme.

### 1.5.2. Capacité vectorielle

Selon le dictionnaire médical de l'Académie de médecine, la capacité vectorielle (CaV) mesure « l'aptitude d'un vecteur à transmettre un agent infectieux en fonction de sa bio-écologie et des conditions de l'environnement » (89). Elle est la résultante de la bio-écologie du vecteur reposant sur différents facteurs tels que sa densité, sa longévité, sa capacité à piquer un hôte, et sa compétence vectorielle, elle-même influencée par les facteurs environnementaux.

Une capacité élevée nécessitera donc une compétence vectorielle élevée et une bio-écologie adaptée. Cependant, de par l'importance des facteurs environnementaux, la CaV doit toujours

être étudiée en fonction d'une relation hôte-vecteur donnée, dans un environnement donné et à une saison donnée.

Elle peut être évaluée selon la formule (90) :

$$CV = m \cdot a \cdot \left(\frac{P}{F}\right) \cdot \exp\left(-\frac{n}{E}\right) \cdot E$$

**m** est la densité des vecteurs. Elle représente le nombre de vecteurs par humain.

**a** est la fréquence à laquelle le vecteur va piquer un humain. C'est le nombre de repas sanguin que le vecteur va faire par jour. Elle va mesurer l'agressivité d'un vecteur vis-à-vis d'une proie. Pour la plupart des espèces de moustiques, elle va correspondre au nombre de pontes car la ponte conditionne généralement la maturation des œufs.

**P** est l'index sang humain. C'est le nombre de repas sanguins pris sur un humain.

**F** est la durée séparant deux repas.

**N** est la durée du cycle d'incubation extrinsèque. C'est la durée nécessaire au pathogène pour finir son cycle de développement.

**E** est l'espérance de vie de la femelle moustique

## 2. Les arboviroses transmises : Dengue, chikungunya et Zika

### 2.1. Introduction : Les arboviroses

Les arboviroses sont des infections virales transmises par le biais d'un vecteur du type arthropode entre des hôtes vertébrés lors d'un repas sanguin. Parmi ces vecteurs, on retrouve la tique, les phlébotomes, les réduves, la mouche tsé-tsé, les glossines, les simulies, etc. Le principal vecteur d'arboviroses est le moustique qui est capable de transmettre la fièvre jaune, la fièvre du Nil occidental, et en particulier pour le moustique tigre, la dengue, le chikungunya et le virus Zika (91).

La classe des arbovirus regroupe différentes familles de virus formant un ensemble hétérogène dont le facteur commun est le mode de transmission. Ils sont à l'origine de maladies dont la symptomatologie et l'épidémiologie vont être différentes.

Les arboviroses sont un enjeu primordial dans la santé des populations. Elles représentent à elles seules plus de 10% de la morbidité des maladies infectieuses dans le monde. La figure 43 illustre que plus de 80% de la population mondiale vit en zone à risque d'au-moins une de ces 7 maladies à transmission vectorielle dont 4 parasitoses et 3 arboviroses : Paludisme, leishmaniose, maladie de Chagas, filariose lymphatique puis dengue, fièvre jaune et encéphalite japonaise (92,93).

Les arboviroses sont souvent co-endémiques ce qui explique que plus de 50% de la population mondiale sont au contact d'au moins 2 arboviroses (fig.43). Les arboviroses sévissent principalement en zone tropicale et subtropicale et se concentrent pour la plupart dans les communautés humaines les plus pauvres et d'autant plus vulnérables qu'ils n'ont pas accès aux moyens de lutte antivectorielle.

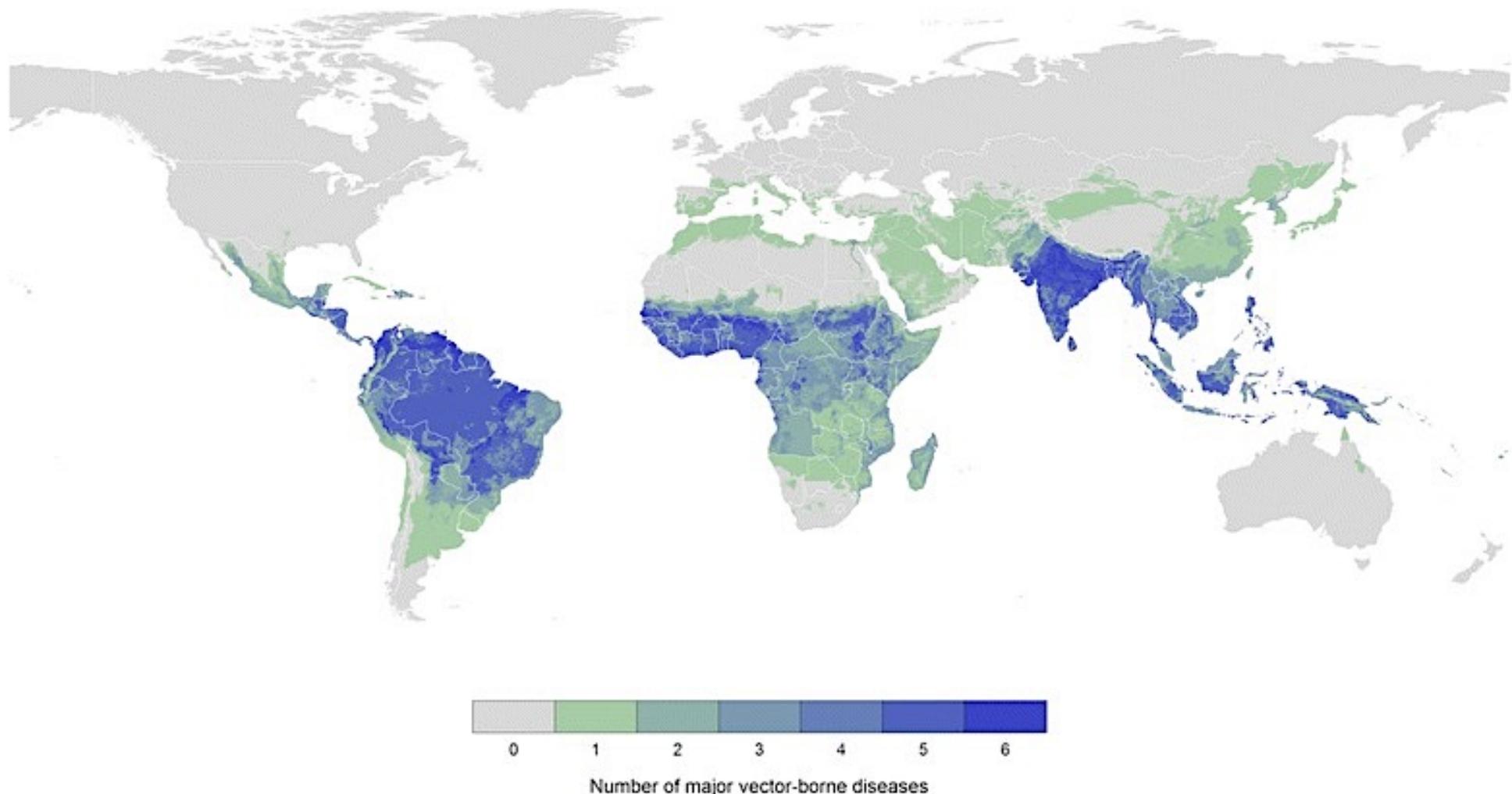


Figure 43 : Répartition mondiale combinée de sept principales maladies à transmission vectorielle pour lesquelles l'intégration des programmes de lutte antivectorielle peut être bénéfique : paludisme, filariose lymphatique, leishmaniose, dengue, encéphalite japonaise, fièvre jaune et maladie de Chagas (92)

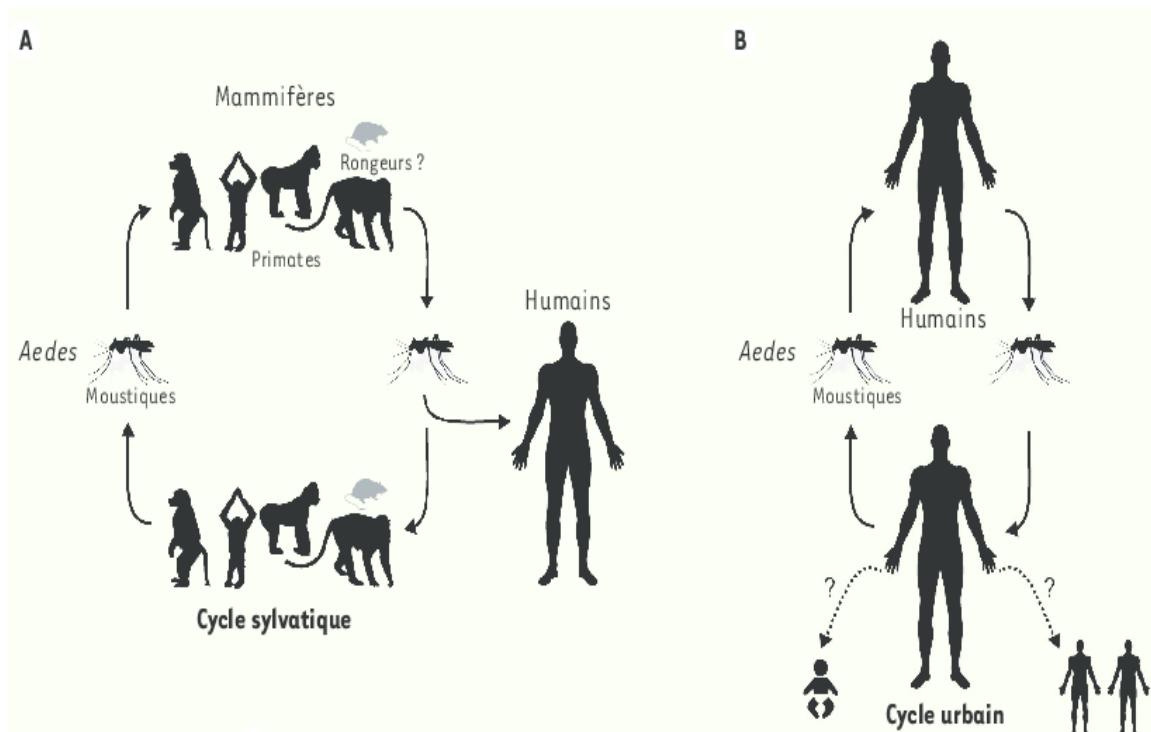
## 2.2. Transmission d'une arbovirose

### 2.2.1. Transmission vectorielle

La transmission vectorielle correspond au passage d'un agent pathogène d'un hôte malade à un hôte sain par l'action d'un vecteur. Il existe dans la nature 2 cycle de transmissions : Sylvatique et urbain (fig.44).

Le cycle sylvatique ou enzootique va impliquer une population animale qui va servir de réservoir au virus et un arthropode vecteur qui va transmettre l'arbovirus d'un animal infecté à un autre. Dans ce cycle l'homme est généralement un hôte accidentel. Ce type de transmission peut intervenir en cas de contact rapproché entre l'homme et des espèces sauvages. Il est souvent responsable de cas sporadique (94,95).

Dans le cycle urbain le réservoir est humain et la transmission se fait d'un hôte malade à un hôte sain. Une densité de population élevée majorera le risque épidémique (94,95).



Dans le cadre de notre sujet, le moustique tigre va être le vecteur, il va permettre le passage du pathogène de la personne infectée à la personne saine (fig.45) (96).

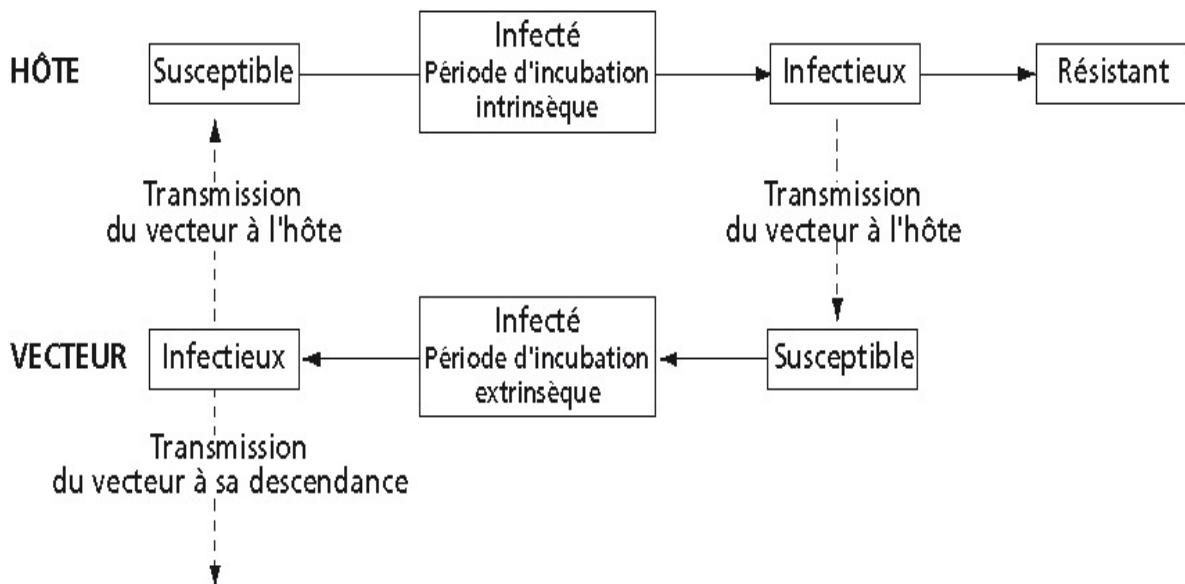


Figure 45 : Représentation d'un modèle transmission d'une infection vectorielle (97)

L'infestation du moustique tigre par l'arbovirus va se dérouler selon le processus de la figure 46. Tout d'abord le virus présent dans le sang de l'hôte va être aspiré par le moustique lors de son repas sanguin (1). Une fois le sang arrivé au niveau de l'intestin, le virus va pénétrer dans les cellules épithéliales intestinales où il va se multiplier (2). Les virus néoformés vont alors passer dans l'hémocèle (cavité interne présente chez les arthropodes contenant l'ensemble des organes) et va ainsi infecter les différents organes (4) dont les glandes salivaires (5). Au prochain repas sanguin du moustique, la sécrétion de la salive lors de la piqûre va entraîner la libération du virus dans le sang et donc l'infection de l'hôte.

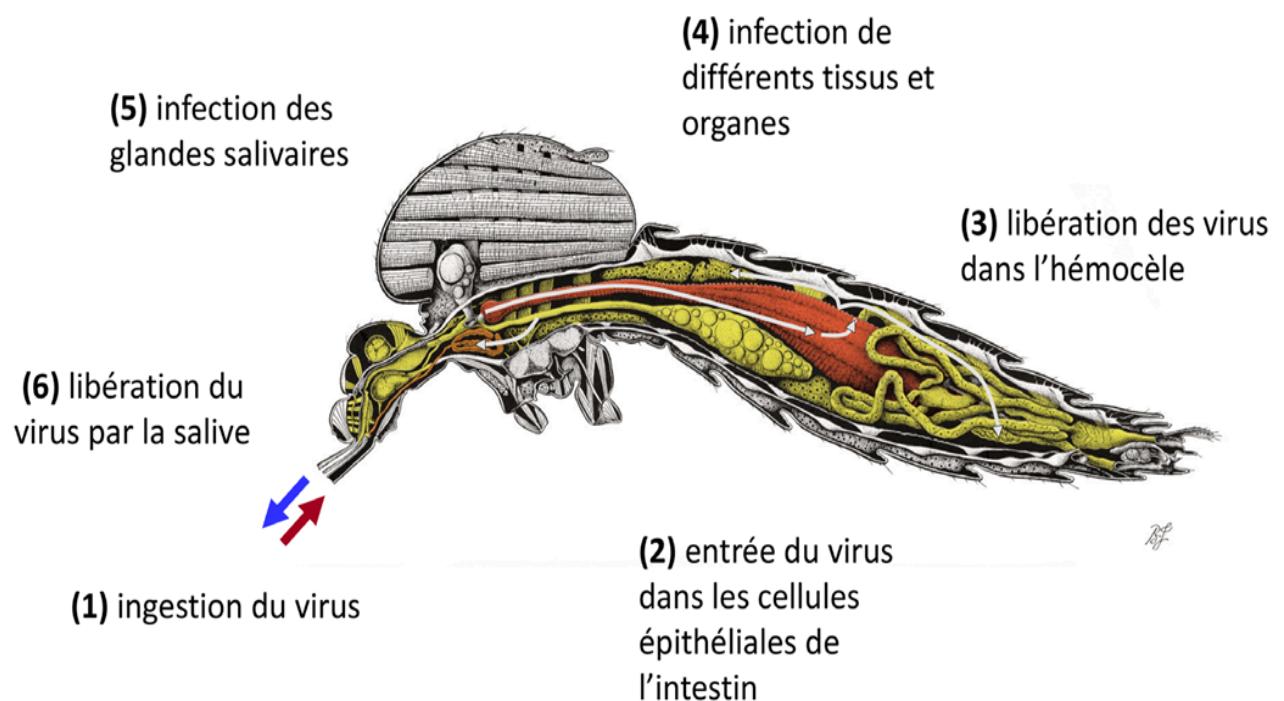


Figure 46 : Les différentes étapes d'infection du moustique par un arbovirus (96)

### **2.2.2. Transmission verticale**

La transmission verticale correspond au passage du virus d'un parent moustique infecté à une partie de sa progéniture. C'est un mécanisme de transmission minoritaire mais essentiel dans le maintien du virus dans la nature. L'étude de ce mécanisme est un levier de compréhension des épidémies d'arboviroses et par conséquent un axe important d'action dans la lutte antivectorielle (96).

### **2.2.3. Autres transmission**

La transmission vectorielle représente la majorité des cas de transmission de dengue, chikungunya et Zika. Cependant en fonction des arbovirus, d'autres mécanismes de transmission existent (95):

- Par transfusion de produit sanguin ou transplantation d'organe infecté
- Sexuel
- Transplacentaire
- Par voie sanguine.

## 2.3. Dengue

La dengue est due à un arbovirus de la famille des *Flaviviridae* et du genre *Flavivirus*. Il existe 4 sérotypes allant de DEN1 à DEN4. C'est la principale arbovirose transmise chez l'homme. Plus de la moitié de la population mondiale est exposée et elle est retrouvée dans plus de 100 pays à travers le monde. L'Asie du sud-est concentre 70% de la charge de morbidité mondiale (98,99). Son incidence a été multipliée par 30 en l'espace de 50 ans ce qui explique l'importante augmentation de la fréquence et du nombre d'épidémies au cours de ces 40 dernières années. Une publication de 2013 estime le nombre réel d'infections annuelles par la dengue à 390 millions (intervalle de confiance à 95% compris entre 285 et 528 millions) dont 96 millions de cas sont cliniquement apparents (98).

Originaire de l'Asie du sud-est, elle s'est répandue pour être présente aujourd'hui en Amérique centrale, en Amérique du sud et en Afrique mais également dans le bassin méditerranéen où des premiers cas de transmission autochtone ont eu lieu en 2010 en France et en Croatie. On la retrouve essentiellement au niveau des latitudes tropicales et subtropicales avec une préférence pour les zones urbaines (fig.47).

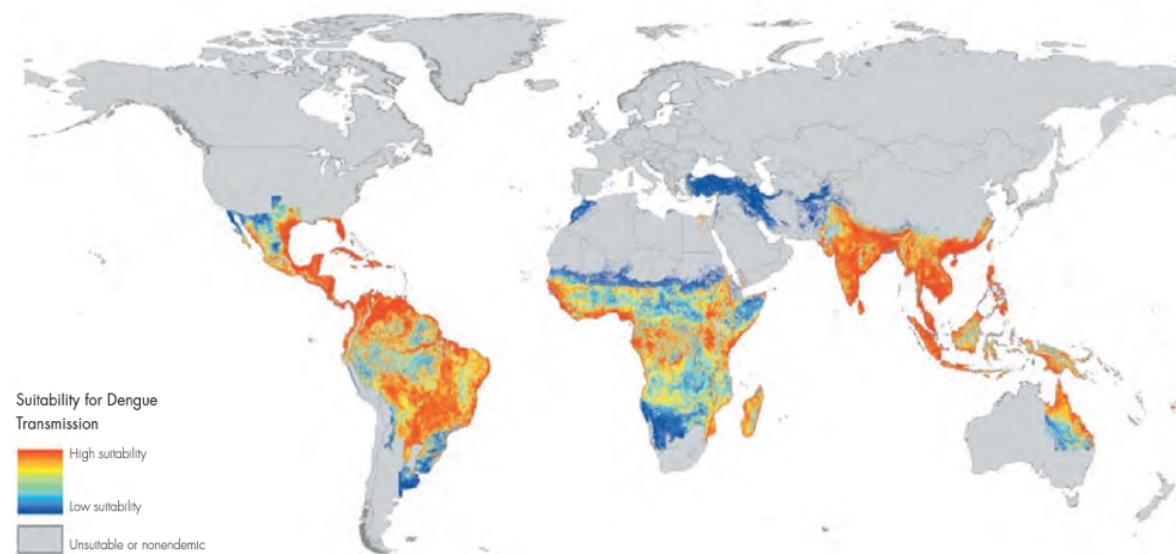


Figure 47 : Carte mondiale du risque de transmission de la dengue (100)

Cinquante à 90% des personnes infectées par le virus de la dengue sont asymptomatiques. Pour les personnes symptomatiques l'incubation a une durée de 4 à 7 jours dans la majorité des cas mais peut s'étaler de 3 à 14 jours. Il existe 2 formes de symptomatologie : la première la plus classique se caractérise par l'apparition d'une importante fièvre ( $40^{\circ}\text{C}$ ) survenant de manière brutale, souvent accompagnée de frissons, de douleurs musculaires, articulaires et

rétro-orbitaires, de maux de tête, de troubles digestifs, de nausées et de vomissements. On retrouve également une éruption cutanée qui apparaît au 5<sup>ème</sup> jour (99,101,102).

Dans 1 à 5% des cas, une forme plus sévère, appelée « dengue grave » ou « dengue hémorragique » peut survenir. Elle va essentiellement concerter les enfants de moins de 15 ans et se caractérise par une augmentation de la perméabilité vasculaire entraînant une fuite plasmatique pouvant conduire à un choc, à des hémorragies ou à des atteintes organiques sévères, en particulier au niveau du système nerveux central, pouvant être mortelle. L'aggravation de la pathologie survient généralement entre le 2<sup>ème</sup> et le 7<sup>ème</sup> jour lors du retour à la normale de la température corporelle ce qui explique que la surveillance clinique doit être particulièrement soutenue au 4<sup>ème</sup> jour (103).

Les dengues dites secondaires, intervenant après une première infection par un autre sérotype, semblent plus à risque d'engendrer une forme grave que les dengues primaires. Entre 1990 et 2013, en moyenne 9200 personnes sont mortes de la dengue chaque année. On estime que 576 900 années de vie ont été perdues notamment à cause d'une importante mortalité infantile (104). Il n'existe à l'heure actuelle aucun traitement de la dengue. La prise en charge repose uniquement sur la prise d'antalgiques et d'antipyrétiques tels que le paracétamol, des antiasthéniques et beaucoup sur le repos. La prise d'anti-inflammatoires non stéroïdiens comme l'aspirine est fortement contre-indiquée au vu du risque hémorragique déjà présent.

Depuis décembre 2015, le premier vaccin contre la dengue est commercialisé sous le nom de Dengvaxia® (CYD-TDV) par Sanofi Pasteur (fig.48). C'est un vaccin vivant atténué recombinant permettant de réduire les formes symptomatiques d'environ 60%. Il est réservé aux personnes de 6 à 45 ans vivant en zone d'endémie et pouvant justifier d'une primo-infection à l'un des 4 sérotypes de la dengue. Cette dernière condition découle d'une analyse en 2017 qui a montré le risque accru de forme grave de la dengue avec hospitalisation chez les personnes séronégatives ayant subi une première vaccination. Le protocole repose sur 3 injections espacées chacune de 6 mois (105,106).



Figure 48 : Vaccin Dengvaxia® mis au point par Sanofi Pasteur (107)

Le diagnostic clinique n'est pas suffisant du fait de la non-spécificité de la symptomatologie. Il va être corrélé à un diagnostic biologique (99) :

- Jusqu'au 5<sup>ème</sup> jour après l'apparition des symptômes, une RT-PCR (Reverse Transcriptase Chain Polymerase Reaction) va permettre de détecter la présence du virus par son génome. La RT-PCR est l'examen de certitude servant de référence.
- Du 5<sup>ème</sup> au 7<sup>ème</sup> jour, une sérologie des IgM va être couplée à une RT-PCR. Suite à une infection, les IgM apparaissent à partir du 5<sup>ème</sup> jour et perdurent en moyenne 2 à 3 mois.
- A partir du 8<sup>ème</sup> jour, une sérologie avec recherche des IgM et des IgG va permettre d'établir le diagnostic. Les IgG apparaissent quelques jours après les IgM lors d'une primo-infection et en même temps lors d'une dengue secondaire et vont perdurer toute la vie du patient.

Que ce soit pour le diagnostic ou pour le suivi du patient, le début d'apparition des symptômes est primordial pour cette pathologie.

## 2.4. Chikungunya

Le chikungunya est une arbovirose endémique des régions tropicales dont le virus (CHIKV) appartient à la famille des *Togaviridae* et au genre *Alphavirus*. Tout comme le virus de la dengue, il est transmis à l'homme par le moustique *Aedes albopictus* mais également par *Aedes aegypti* lors de son repas sanguin. Il existe 3 génotypes portant le nom de leur zone géographique : asiatique, ouest-africain et sud-africain (108).

La première trace du chikungunya remonte au début du 19<sup>ème</sup> siècle mais le virus sera pour la première fois isolé chez l'homme lors d'une épidémie en 1952 en Tanzanie. Lors des décennies suivantes, le CHIKV va se cantonner à des régions en Afrique et en Asie du sud-est avant de connaître une expansion fulgurante. En effet, à partir des années 2000, de nombreuses épidémies vont se déclarer à travers le monde (fig.49).

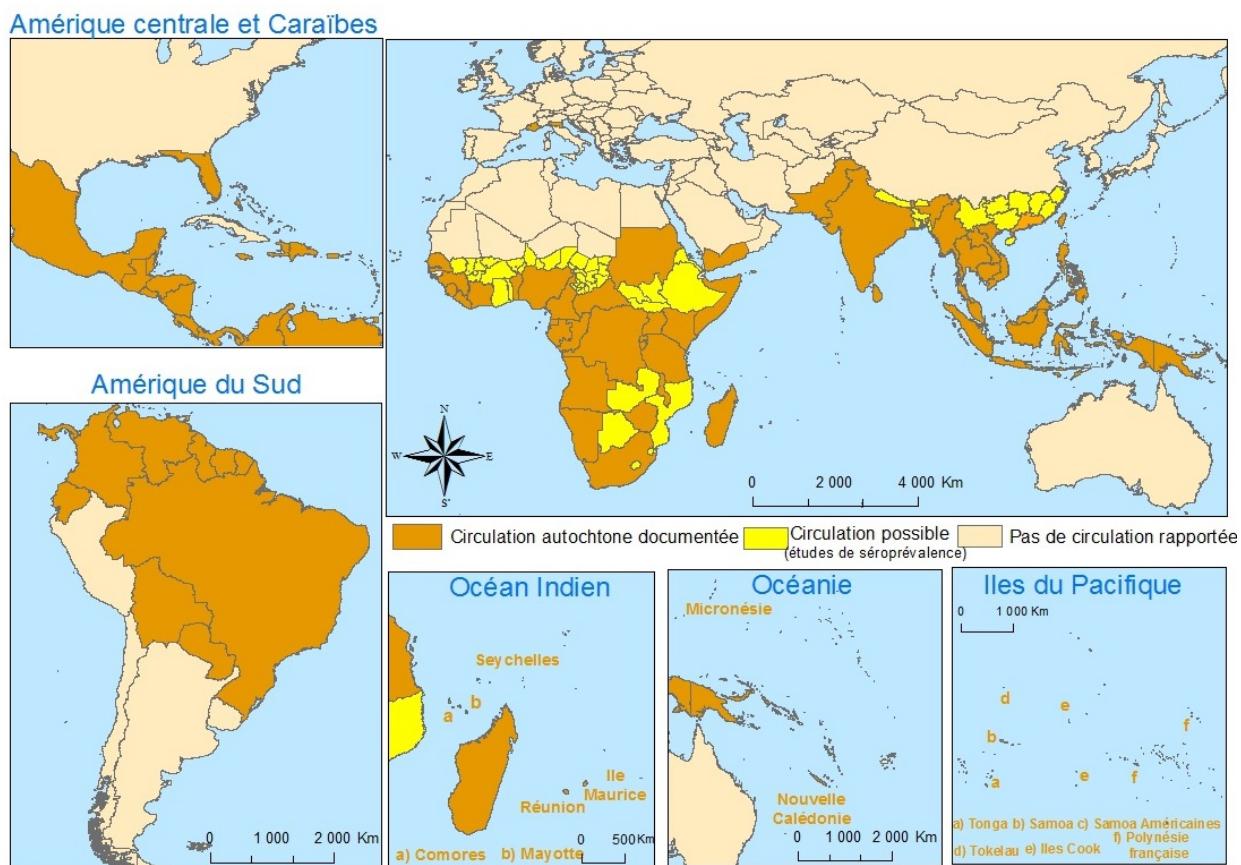


Figure 49 : Carte de présence du chikungunya dans le monde (112)

En 2005, l'Inde va être très durement touchée par le CHIKV qui va notamment se développer en Indonésie, dans les Maldives, la Birmanie et la Thaïlande qui ont déclaré au cours de cette année 2022 plus d'1,9 millions de cas. En 2007, des premiers cas autochtones de chikungunya ont été déclarés en Europe, dans le nord-est de l'Italie qui ont conduit à 197 cas (109). En 2013, 2 cas autochtones ont été détectés sur l'île de Saint Martin (Antilles), ce sont les

premiers cas documentés dans cette région. Ils ont préfiguré l'épidémie en avril 2015 qui a causé 1 379 788 cas suspects, localisés en Amérique centrale, en Amérique latine et dans les Etats-Unis d'Amérique. C'est en 2014 que la France est touchée pour la première fois par un cas autochtone sur le territoire métropolitain à Montpellier (110,111).

L'infection par la chikungunya est asymptomatique dans 5 à 40% des cas. Lorsque les malades sont symptomatiques, une fièvre brutale apparaît après 4 à 7 jours d'incubation couplée dans 30 à 90% des cas à une arthralgie mais aussi fréquemment à des maux de tête et à une éruption cutanée. C'est la phase aiguë d'une durée d'environ 7 jours. Cette arthralgie est dans la plupart des cas une polyarthralgie bilatérale et symétrique qui va concerter essentiellement les petites ceintures articulaires (les doigts, les poignets, les chevilles, les coudes, les pieds) (113). Son nom est issu d'une expression makondée (peuple vivant entre la Tanzanie et le Mozambique) signifiant « qui marche courbé en avant ». Elle fait écho à la posture qu'adopte les patients souffrant de douleurs articulaires. Des manifestations cliniques ophtalmiques (conjonctivite, névrite optique, rétinite, uvéite, etc.) (114), cardiaques (hypotension, choc et collapsus circulatoire, arythmie, souffle, myocardite, etc.) (115) et neurologiques (encéphalite, myéloneuropathie, myopathie) existent également (116).

La rémission des symptômes cliniques prend généralement quelques jours. Cependant dans les semaines et mois qui suivent, certains patients développent une forme chronique se manifestant par des douleurs articulaires, des troubles neurosensoriels et cérébraux. L'enquête TELECHIK réalisée sur l'île de la Réunion a mis en évidence que des symptômes prolongés ou tardifs attribuables au CHIKV se retrouvaient en moyenne chez 43 à 75% des personnes ayant été infectées 2 ans auparavant (113).

Tout comme pour la dengue, le traitement est essentiellement symptomatique et repose par conséquent sur des médicaments antipyrrétiques, antalgiques et anti-inflammatoires non-stéroïdiens (AINS). Dans certains cas l'utilisation de corticoïdes peut être préconisée mais les résultats sont aléatoires. En cas de chronicisation des arthralgies, le méthotrexate, l'hydroxychloroquine ou la sulfalazine peuvent être utilisés même si leur efficacité systématique n'est pas démontrée (108). Aucun vaccin n'existe encore aujourd'hui.

Le diagnostic n'est pas seulement clinique du fait de la non-spécificité de la symptomatologie (dengue-like), il est corrélé à un diagnostic biologique (117) :

- Jusqu'au 5<sup>ème</sup> jour après l'apparition des symptômes, une RT-PCR (Reverse Transcriptase Chain Polymerase Reaction) va permettre de détecter le virus par son génome. C'est l'examen de référence.
- Du 5<sup>ème</sup> au 7<sup>ème</sup> jour, une sérologie (test ELISA) des IgM va être couplée à une RT-PCR. Les IgM apparaissent à partir du 5<sup>ème</sup> jour et perdurent en moyenne 2 à 3 mois.
- A partir du 8<sup>ème</sup> jour, c'est une sérologie des IgM suivie d'une sérologie des IgG une dizaine de jours après qui va permettre le diagnostic.

La temporalité de la maladie va être également primordiale dans le diagnostic de la maladie.

## 2.5. Zika

La maladie Zika est due à un virus (ZIKV) de la famille des *Flaviridae* et du genre *Flavivirus* transmis essentiellement par *Aedes aegypti* et secondairement par *Aedes albopictus*. Découvert en 1947 en Ouganda chez des singes lors d'une mission de surveillance de la fièvre jaune sylvatique, les premiers malades ont été diagnostiqués en 1952 dans ce même pays et en Tanzanie. Durant les 60 années qui ont suivi sa découverte, le ZIKV est resté cantonné aux zones équatoriales de l'Afrique et de l'Asie. En 2007, il a été détecté sur l'île de Yap en Micronésie puis il poursuit son expansion vers la Polynésie Française en 2013 puis au Brésil en 2015 et va durant la même année se répandre dans une grande partie de l'Amérique du sud et centrale (Colombie, Salvador, Guatemala, Mexique, Panama, Paraguay, Venezuela, etc.) (fig.50) (118,119).

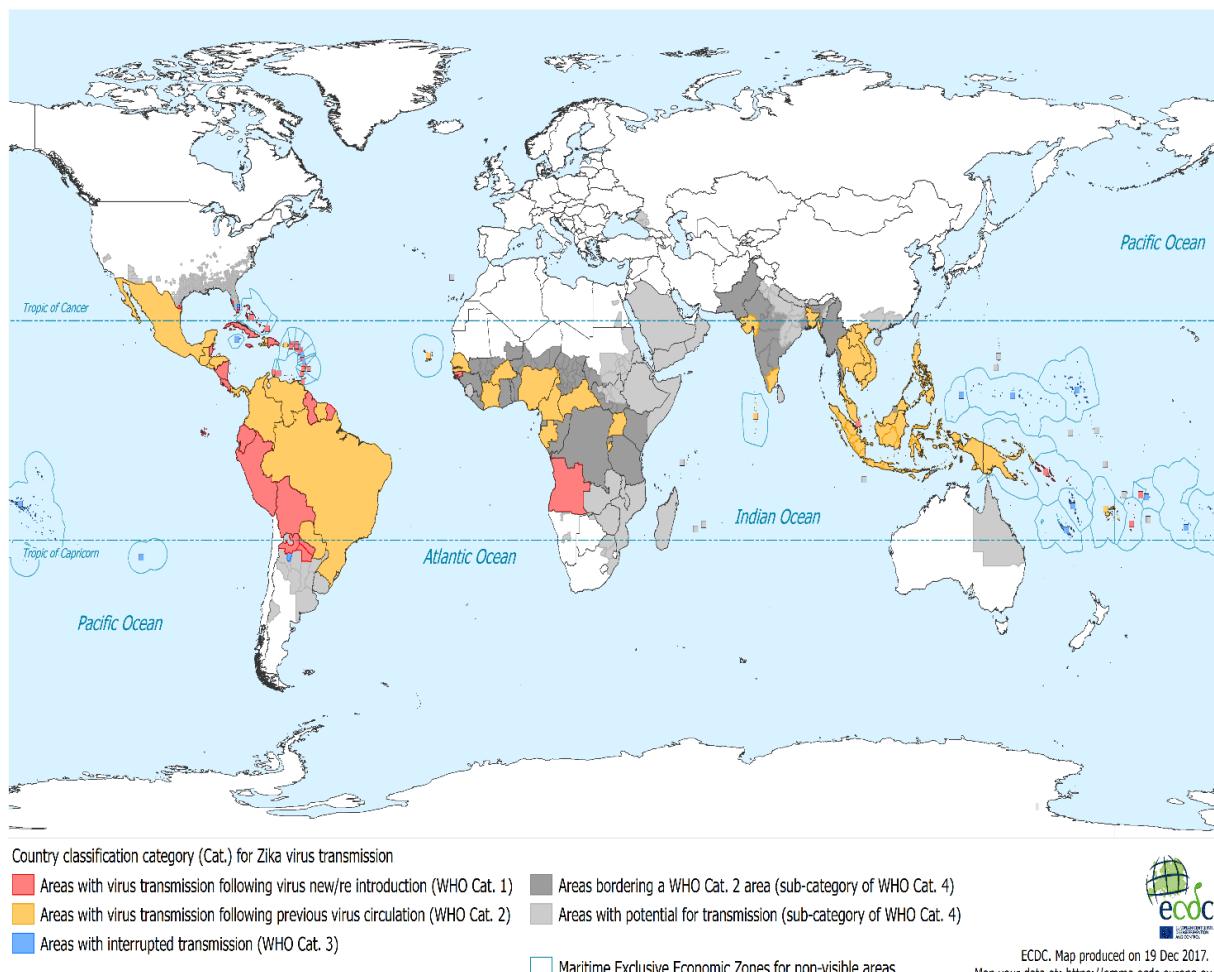


Figure 50 : Carte de présence du virus Zika dans le monde (112)

Soixante-dix à 80% des personnes infectées par le ZIKV sont asymptomatiques. Chez les personnes symptomatiques, les premiers symptômes arrivent après une période d'incubation pouvant aller de 3 à 12 jours après la piqûre du moustique. Les symptômes ressemblent à une

grippe avec une légère fièvre, des myalgies et arthralgies, des céphalées, une asthénie (120). Ces symptômes peuvent être accompagnés d'une conjonctivite, de douleurs rétro-orbitales, d'une éruption cutanée maculopapuleuse. La symptomatologie est généralement corrélée à la virémie et décroît donc au bout d'une semaine environ. Cependant des douleurs articulaires peuvent perdurer jusqu'à un mois après l'infection (118).

Pour cette pathologie les complications sont rares mais dans certains cas, elles peuvent conduire à l'apparition d'un syndrome de Guillain-Barré, retrouvé également dans les cas d'infection par la dengue ou le chikungunya. Il se caractérise par une paralysie ascendante progressive réversible dans la plupart de cas, mais pouvant entraîner la mort chez 3 à 5% patients (118,121).

Lors de l'infection au ZIKV, il existe un risque important de transmission materno-fœtale pouvant être à l'origine de microcéphalie chez le bébé. Il en existe 2 types : congénitale ou primaire qui est présente à la naissance et post-natale ou secondaire qui apparaît après la naissance. Au cours d'une épidémie de Zika, plus de 5000 cas de microcéphalies ont été recensés au Brésil entre mars 2015 et avril 2016 soit une multiplication par 20 de l'incidence antérieure (122). En plus d'être transmis à l'homme lors d'une piqûre de moustique, le ZIKV se transmet également par voie sexuelle. Cette transmission accentue les risques d'infection de la femme enceinte et donc le développement de microcéphalie chez l'enfant à naître (123).

Le traitement est exclusivement symptomatique et repose sur la prise d'antalgiques et d'antipyrétiques. Aujourd'hui aucun vaccin n'existe pour cette pathologie. Le diagnostic repose sur l'analyse de différents prélèvements en fonction de la date de début des symptômes (120) :

- De J0 à J5 : RT-PCR sur prélèvement sanguin et urinaire.
- De J6 à J10 : RT-PCR sur prélèvement urinaire couplé à une sérologie des IgM anti-ZIKV confortée par une deuxième sérologie une dizaine de jours plus tard pour détecter des IgG anti- ZIKV.

## 2.6. Prévention et lutte antivectorielle

Parmi les maladies vectorielles telles que la dengue, le chikungunya et le Zika, seule la première fait l'objet d'un vaccin pouvant être utilisé en prévention chez les personnes à risque vivant en zone d'endémie et ayant déjà été infectées. La prévention de ces pathologies repose donc principalement sur des mesures de prophylaxie individuelles vis-à-vis des piqûres de moustiques mais également sur des mesures collectives, la lutte antivectorielle.

Selon l'Institut de recherche pour le développement (IRD), la lutte antivectorielle regroupe l'ensemble des mesures visant à « *réduire le risque d'endémisation du pathogène, diminuer la transmission d'agents pathogènes par des vecteurs, gérer les épidémies de maladies à vecteurs* » (124). Pour y parvenir, elle s'appuie sur la coordination entre la lutte par les biocides, la lutte biologique et la lutte génétique par l'utilisation de vecteurs génétiquement manipulés mais également sur « *la protection individuelle, l'action sur l'environnement, l'éducation sanitaire et la mobilisation sociale* » (124).

### 2.6.1. Lutte anti-vectorielle individuelle

#### a) La protection personnelle anti-vectorielle (PPAV)

La PPAV va avoir pour objectif de réduire le risque de piqûre de moustique afin de réduire le risque de transmission d'arbovirose. C'est le rôle du médecin et du pharmacien d'officine d'accompagner les patients dans le choix et l'achat de leurs moyens de protection individuelle.

Parmi ces moyens, on retrouve les protections mécaniques qui vont empêcher le contact humain-moustique comme le port de vêtements longs ou l'utilisation de moustiquaires. Ce sont les protections les plus efficaces à condition que les protections soient bien couvrantes et en bon état, en particulier pour les moustiquaires. Les protections mécaniques peuvent être imprégnées de substances insecticides ayant également une action répulsive comme la perméthrine afin de créer une synergie d'action. Cette molécule appartient à la famille des pyréthrinoïdes qui ont un effet rémanent stable c'est-à-dire qu'une fois imprégnée sur un tissu, ses effets répulsifs vont perdurer. En général, sa durée d'action est de 2 mois et elle résiste à plusieurs lavages (4 à 6). Sur les moustiquaires, l'effet peut perdurer jusqu'à 3 ans (118).

Parmis l'arsenal des protections chimiques on va retrouver les répulsifs à application cutanée. Ces derniers vont avoir comme rôle d'éloigner les moustiques sans les tuer. On retrouve dans cet arsenal le DEET (N,N-diéthyl-m-toluamide), l'IR3535®, la picaridine, et le PMD (p-menthane-3,8-diol). Leur durée d'action est au minimum de 4 heures et dépend de leur concentration, des formes galéniques ainsi que de différents facteurs comme le vent, la transpiration, les frottements, etc. En fait, ces protections chimiques doivent dans l'idéal regrouper 10 caractéristiques (126) :

- Un coût raisonnable pour un usage large
- 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
- L'absence de toxicité
- Une rémanence suffisante

Parmi les autres mesures permettant de se protéger, on trouve l'utilisation de serpentins fumigènes en extérieur ou l'utilisation de la climatisation, de la ventilation ou de diffuseur électrique d'insecticides en intérieur. L'ensemble des moyens de prévention individuelle contre les piqûres de moustique sont détaillés dans le tableau 3 mis à disposition par Santé Publique France pour les personnes partant en voyage.

Tableau 3 : Moyens de prévention disponibles contre les piqûres de moustiques (127)

<b>Moyens recommandés</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Moustiquaire imprégnée d'insecticides pour berceau, poussette ou lit, selon l'âge et les vecteurs ;</li> <li>• Moustiquaires grillagées aux fenêtres et aux portes ;</li> <li>• Répulsifs cutanés sur les parties du corps non couvertes, en complément du port de vêtements amples, couvrants et légers.</li> </ul>
<b>Moyens recommandés en appui</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vêtements imprégnés d'insecticide (dans les zones à densité de moustiques élevée, lors d'une épidémie dont le vecteur est le moustique) ;</li> <li>• Diffuseur électrique d'insecticide (à l'intérieur) ;</li> <li>• Raquettes électriques ;</li> <li>• Pulvérisation intradomiciliaire 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>
<b>Moyens non recommandés (efficacité non démontrée - à ne pas utiliser)</b>	<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 ; [à noter que le PMD (ou « huile d'eucalyptus citronnée ») n'est pas une huile essentielle à proprement parler] ;</li> <li>• Les appareils sonores à ultrasons, la vitamine B1, l'homéopathie, les rubans, les papiers et autocollants gluants sans insecticide.</li> </ul>

## b) Elimination des gîtes larvaires

A l'instar des PPAV, l'élimination des gîtes larvaires par les populations est primordiale dans la LAV. En empêchant le cycle de développement du moustique tigre, on réduit le nombre de vecteurs et ainsi le risque de transmission d'arboviroses. A titre individuel, les populations humaines vont pouvoir agir au niveau du cycle aquatique du moustique en l'empêchant de pondre ou en évitant la formation de réserves d'eau propice à la ponte. Il est ainsi recommandé de protéger les réserves d'eau à l'aide d'une moustiquaire, de protéger de la pluie les objets pouvant se transformer en contenant comme certains déchets, des pneus, des bacs à fleurs et de les vider régulièrement. Ces mesures sont primordiales dans la LAV car 80% des réservoirs utilisés par le moustique tigre sont d'origine humaine (fig.51).

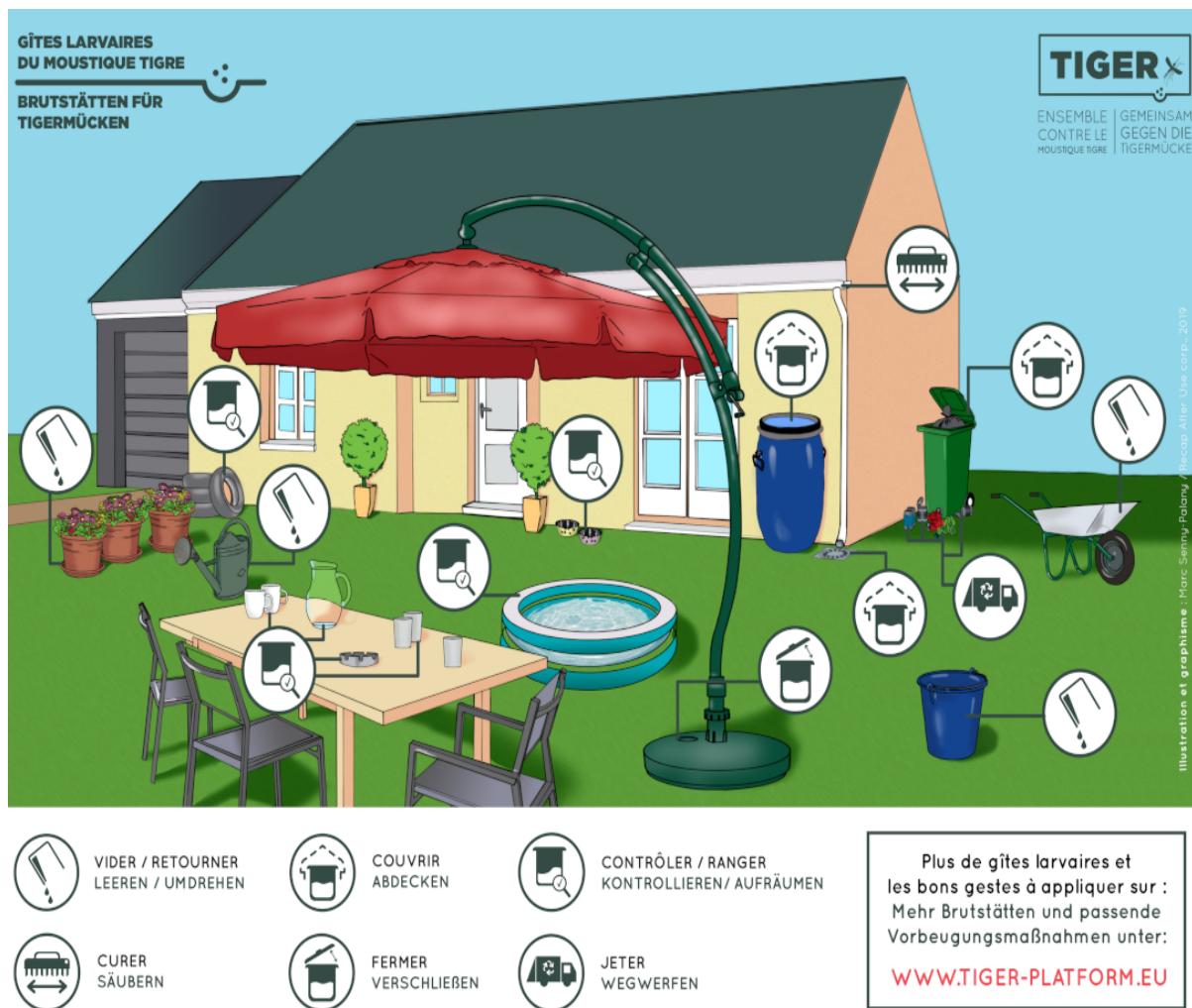


Figure 51 : Lieu potentiel de gîte larvaire et mesure adaptée d'élimination (128)

## 2.6.2. Lutte anti-vectorielle collective

### a) Action sur l'environnement

#### Destruction des gîtes larvaires

Tout comme pour la lutte antivectorielle individuelle, la régulation des populations de vecteurs est un enjeu pour les habitats humains collectifs où le moustique tigre s'est implanté. Elle passe par la destruction des gîtes larvaires dans les espaces publics et par un travail global de réflexion sur l'urbanisation afin d'éviter la stagnation de l'eau. Cette réflexion concerne le mobilier urbain, le ramassage et le stockage des déchets, la gestion des eaux de pluie, le contrôle des zones humides, etc. (129)

#### Lutte insecticide

Des insecticides chimiques comme la deltaméthrine (adulticide) ou biologiques comme l'utilisation de la bactérie *Bacillus thuringiensis israelensis* (Bti) (larvicide) sont les seuls produits autorisés actuellement en France dans la lutte anti-vectorielle collective (130). Cependant le moustique tigre fait preuve d'une grande plasticité génétique à l'origine de résistance à ces insecticides. A contrario d'autres espèces non-ciblées, bénéfiques pour les écosystèmes vont être impactées par l'utilisation de ces insecticides ce qui va bouleverser les chaînes alimentaires locales et déséquilibrer les écosystèmes, c'est ce que l'on appelle l'écotoxicité. Compte tenu de ces inconvénients, l'utilisation de ces molécules est très réglementée et doit faire l'objet d'une enquête préalable à leur diffusion environnementale (131).

#### Lutte biologique

La lutte biologique repose sur l'utilisation d'organismes vivants pour réguler les populations d'espèces invasives, comme le moustique tigre. Elle repose aujourd'hui essentiellement sur 3 axes : utilisation de prédateurs naturels, relargage de mâles stérilisés et infection par une bactérie.

L'utilisation d'espèces prédatrices est la méthode impactant le moins l'environnement à condition qu'elle repose sur l'utilisation d'espèces endémiques et non-invasives. Cette méthode va cibler la phase aquatique du moustique mais également la phase adulte aérienne.

Pour la phase aquatique nous allons retrouver (125) : Des plantes se nourrissant des larves telles que l'utriculaire (*Utricularia vulgaris*), des poissons comme la gambusie (*Gambusia affinis*) et le poisson rouge (*Carassius auratus*) et des larves de libellule (*Libellula quadrimaculata*).

En ce qui concerne la phase adulte, ce sont essentiellement les oiseaux, les chauves-souris, les libellules et autres insectes qui vont permettre de réguler les populations de moustique. Ceci passe par la mise en place de mesures visant à protéger et à favoriser la présence de ces espèces : installation de nichoirs, de chiroptéroducts (passerelles à chauves-souris dans les murs ou les toits) (132), d'abris à insectes mais également la non-utilisation d'insecticides généralistes ou encore le contrôle de la chasse.

Le relargage de mâles génétiquement modifiés est également à l'essai. Une mutation provoquée chez le mâle rend les larves, issues de la fécondation par un mâle muté avec une femelle, incapables de survivre dans des conditions naturelles. Lors d'un essai de grande ampleur réalisé au Brésil en 2014, les résultats ont montré qu'une partie de la descendance avait quand même survécu et avait pu se reproduire pour former une nouvelle génération hybride. C'est une piste qui malgré des résultats ambigus reste en cours d'exploration (133).

En 2019 sur l'île de Nouméa, des populations *d'Aedes aegypti* ont été relâchées par le laboratoire Pasteur (134). Ces populations avaient la particularité d'être infectées par une bactérie du genre Wolbachia. Elle infecte essentiellement les arthropodes ce qui a pour action de réduire la transmission d'arbovirus en empêchant le cycle de vie du moustique. En outre, cette bactérie a pour caractéristique d'être transmise à la descendance du moustique la rendant ainsi plus résistante aux arbovirus. Cette expérience a déjà montré ses preuves en Australie et ne semble pas avoir d'impact sur l'humain ou les espèces animales ou végétales (125).

## **b) Education sanitaire**

L'éducation sanitaire est selon l'OMS « tout ensemble d'activités d'information et d'éducation qui incitent les gens à *vouloir* être en bonne santé, à *savoir* comment y parvenir, à *faire* ce qu'ils peuvent individuellement et collectivement pour conserver la santé, à *recourir* à une aide en cas de besoin » (136). Elle occupe une place primordiale dans la lutte antivectorielle. L'adhésion de la population permet de faire de chaque citoyen un acteur dans la santé

publique. Son action est d'autant plus primordiale que la majorité des gîtes larvaires sont d'origine humaine et pourrait donc être évités.

L'éducation sanitaire est portée par différentes organisations dont les plus actives : les agences régionales de santé (ARS), l'institut national d'éducation et de prévention pour la santé (INPES), l'institut Pasteur et l'entente interdépartementale de démoustication (EID). Les professionnels de santé et autres acteurs de l'éducation ont également un rôle important dans la transmission des connaissances. Différents outils sont mis à disposition : films, flyers, posters, spots publicitaires, évènements, site internet, logiciels d'application, sorties scolaires, réseaux sociaux, etc (125,137).

### **c) Maladie à déclaration obligatoire (MDO)**

Afin de limiter le risque de propagation et de flambée épidémique, tout cas d'infection aux virus Zika, du chikungunya ou de la dengue sur le territoire métropolitain doit faire l'objet d'une déclaration obligatoire auprès de l'ARS (23,138). Celle-ci doit être faite en cas de suspicion ou dès qu'un diagnostic est posé. La déclaration se fait à l'aide d'une fiche pré-remplie disponible sur le site internet de Santé publique France (annexe 1) (139).

Pendant la période d'activité du moustique du 1<sup>er</sup> mai au 30 novembre, le plan de surveillance renforcé est mis en place en métropole. Ce dispositif s'articule en 3 actions (140):

- Une surveillance des malades qui repose sur la déclaration obligatoire des malades.
- Une surveillance des populations de moustique avec la réalisation d'enquête entomologique
- Une sensibilisation des populations avec la mise en place de mesure de lutte antivectorielle collectives.

## **PARTIE 3 : Facteurs favorisant l'émergence du moustique tigre en France métropolitaine**

### **1. Rôles des activités humaines sur l'endémisation d'*Aedes albopictus* sur de nouveaux territoires**

#### **1.1. Des activités humaines support de la migration d'*Aedes albopictus***

##### **1.1.1. L'histoire d'une invasion tout autour du globe**

Le moustique tigre est originaire d'Asie du sud-est où le climat des forêts tropicales lui assure des conditions idéales pour son cycle de développement. L'histoire de l'expansion de son territoire commence avec l'apparition et l'essor de la navigation à voile. Grâce à leur faculté de résistance, les œufs d'*Aedes albopictus* ont pu survivre aux longues traversées en mer. Ce serait par le transport de noix de coco, servant de denrées alimentaires pour les marins, que les œufs de moustique tigre auraient été importés à Madagascar puis de proche en proche dans les îles voisines de l'océan indien au début de l'ère chrétienne (141). A partir du 19<sup>ème</sup> siècle, un grand bouleversement va donner une nouvelle dynamique à la propagation du moustique tigre : c'est l'invention du premier bateau à vapeur due à Robert Fulton en 1803. Ce progrès technique a permis de couvrir les mêmes distances mais en un temps considérablement réduit : Une traversée partant de Tamatave (ville de l'ouest de Madagascar) jusqu'à l'île Maurice ne durait pas plus de 2 jours au lieu des 2 semaines auparavant. Cette nouvelle technologie a augmenté considérablement les échanges commerciaux tout en participant à la diffusion du moustique tigre sur des territoires auparavant préservés de sa présence.

Depuis cette époque, les moyens de transport se sont considérablement améliorés ne cessant de réduire les temps de transport d'un point à l'autre du globe et permettant une mondialisation des échanges commerciaux. Le recyclage des pneus et leur commerce en est l'exemple parfait mais également une des causes majeures de l'apparition du moustique tigre dans de nombreux territoires du globe. C'est ainsi que le commerce international a conduit à l'importation de ce moustique au Texas depuis le Japon en 1985 et en Nouvelle-Zélande en 1993 (fig.52). En 1986, il est arrivé à Rio de Janeiro au Brésil après avoir emprunté une route maritime depuis Singapour. C'est de cette même manière qu'il serait arrivé à Gênes en 1990.

Avec le développement de l'automobile et du réseau ferroviaire, le moustique se serait ensuite répandu dans tout le Mexique à partir des Etats-Unis, et en Italie depuis Gênes. En ce qui concerne l'apparition du moustique tigre en Albanie en 1975 et au Nigeria en 1990, il semblerait que ce soit le transport aérien qui en soit responsable. Aujourd'hui, aucun point du globe n'est à plus de 48 heures de vol d'un autre point ce qui rend une dissémination mondiale des vecteurs tout à fait possible (141).

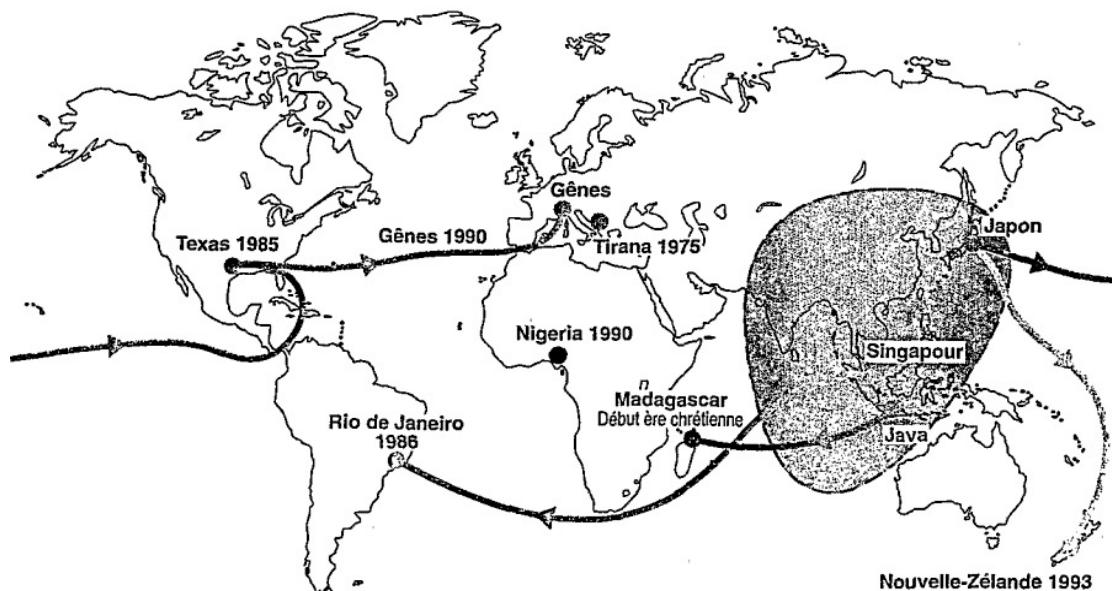


Figure 52 : Dispersion mondiale d'*Aedes albopictus* (141)

Dorénavant le moustique tigre est présent sur tous les continents hormis l'Antarctique dont les températures négatives pendant une grande partie de l'année empêchent le bon déroulement du cycle de vie du moustique (fig.53).

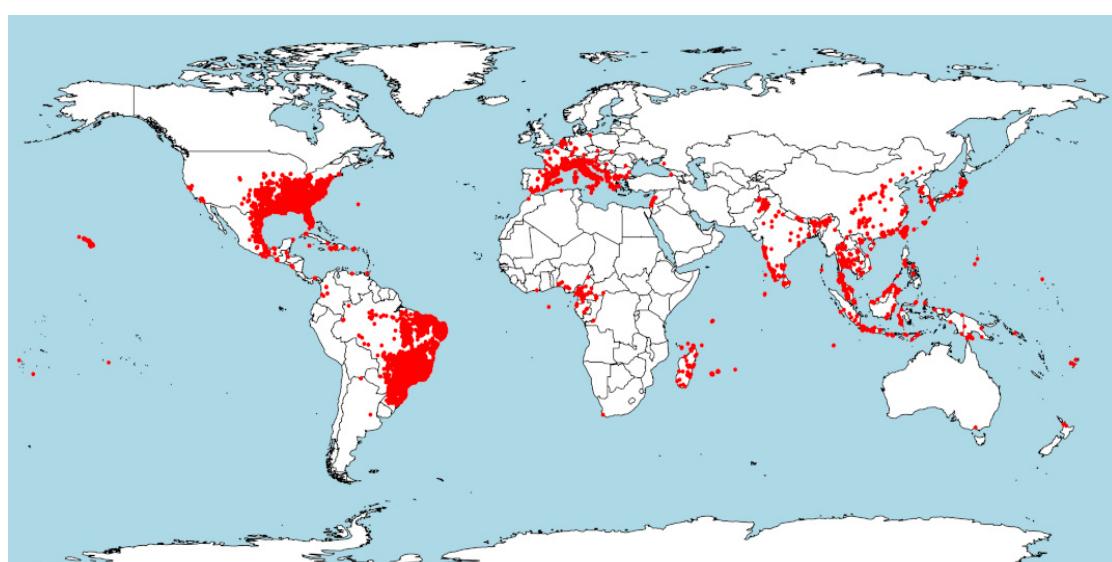


Figure 53: Distribution géographique mondiale d'*Aedes albopictus*. Les points rouges représentent les données d'occurrences (N = 38367) obtenues à partir des données du projet Global Biodiversity

Information Facility (GBIF) (142)

### 1.1.2. L'invasion du territoire français métropolitain

En 1998, l'agence nationale pour la démoustication et la gestion des espaces naturels démoustiqués, connue sous l'acronyme « ADEGE », a informé le ministre de la santé du risque important d'implantation d'*Aedes albopictus* en France métropolitaine. Cette information a permis la formation d'un comité de surveillance qui a détecté pour la première fois en 1999, des imagos dans 2 zones de stockage de pneus usagés dans l'Orne (Normandie) et dans la Vienne (Poitou-Charentes). Il est certain que ces pneus ont été importés des Etats-Unis ou du Japon.

A la suite de cette épisode d'implantation du moustique, des mesures renforcées de prospection ainsi que de contrôle (lutte chimique) ont permis de révéler 3 autres lieux d'émergence du vecteur : dans le Val-d'Oise (Île de France) en 2002, dans la Seine et Marne (Île de France) en 2004 et dans le Calvados (Normandie) en 2006. Un traitement anti-moustiques a été déclenché dans ces sites, ce qui a permis de les éradiquer. Les moustiques sont vraisemblablement issus d'une cargaison de pneus en provenance des Etats-Unis (143,144).

A cette même époque, le commerce des plantes aquatiques a également été pointé du doigt comme source possible d'introduction du vecteur. Malgré des plaintes déposées contre des entreprises, aucune enquête n'a abouti mettant en cause ce commerce dans l'importation d'*Aedes albopictus* en France métropolitaine.

De 2002 à 2005, afin de prévenir ce risque, un réseau de pièges à œufs de moustiques (ovitraps) a été mis en place sur les parkings des stations-services des autoroutes reliant la France à l'Espagne ou l'Italie, ainsi que sur les parkings des ports maritimes corses. Ces mesures ont fait suite à une première alerte en 2002 dans un village de vacances de Haute Corse.

C'est à partir de sa détection en 2004 dans un jardin botanique de Menton (Alpes-Maritimes) que le moustique tigre s'est implanté durablement dans l'hexagone et a commencé son expansion sur le territoire métropolitain. Malgré des mesures renforcées, de nouvelles populations de moustique tigre ont été découvertes sur la côte d'Azur, à Nice puis à Bastia. Depuis, le moustique tigre a connu une expansion rapide à travers le territoire français (fig. 54, 55, 56) en empruntant les axes routiers et ferroviaires. Aujourd'hui des ovitraps détectent la présence d'œufs de moustiques tigres sur des aires de repos en Belgique (145).

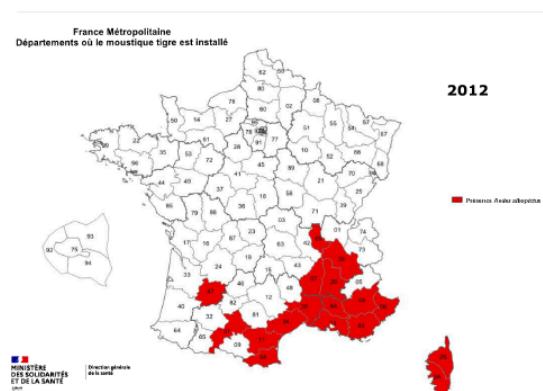
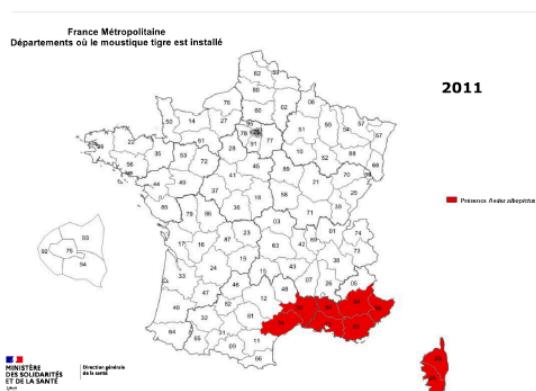
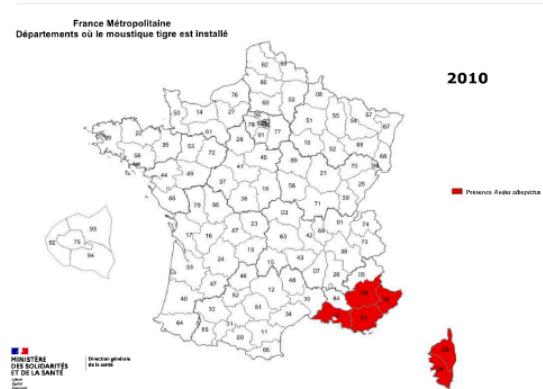
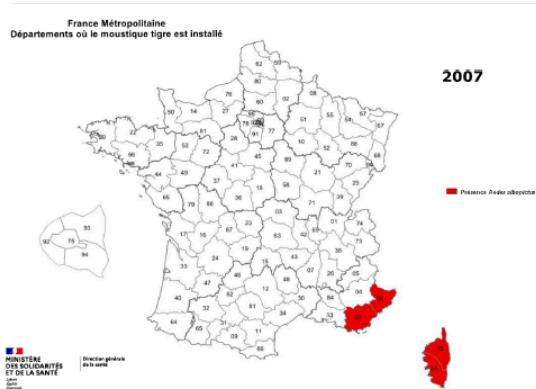
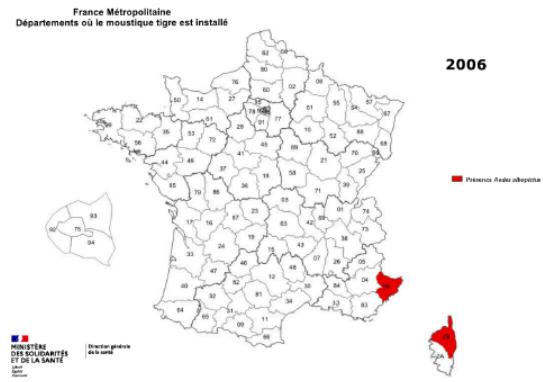
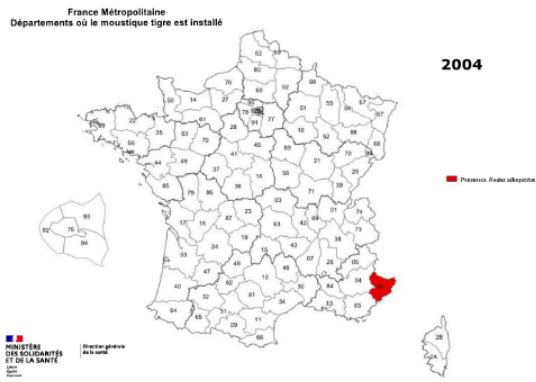


Figure 54 : Diffusion d'*Aedes albopictus* dans les départements de métropole de 2004 à 2012 (146)



Figure 55: Diffusion d'*Aedes albopictus* dans les départements de métropole de 2013 à 2018 (146)

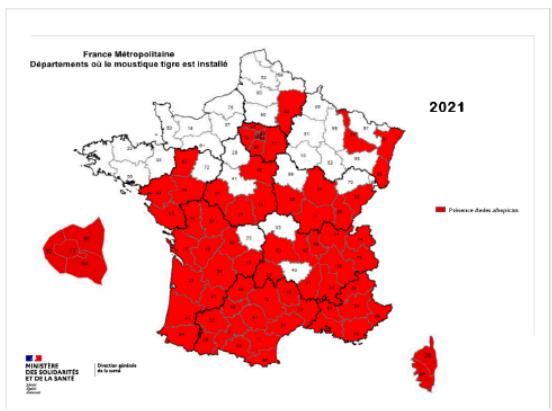
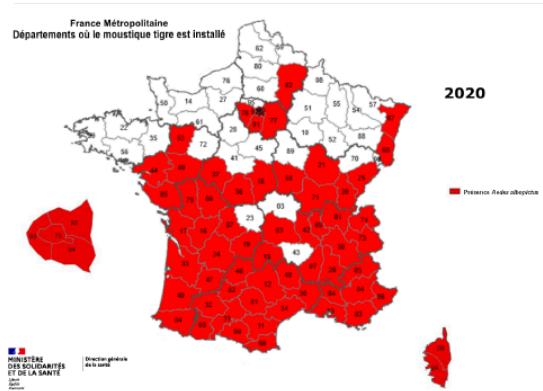
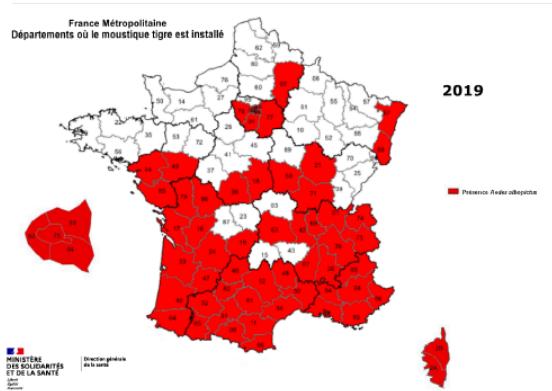


Figure 56 : Diffusion d'*Aedes albopictus* dans les départements de métropole de 2019 à 2021 (146)

Depuis le premier janvier 2022, 67 des 96 départements de métropole sont colonisés par le moustique tigre (fig.57) et plus de 40% de la population humaine résidant dans le sud de la France y est exposée (fig. 58).

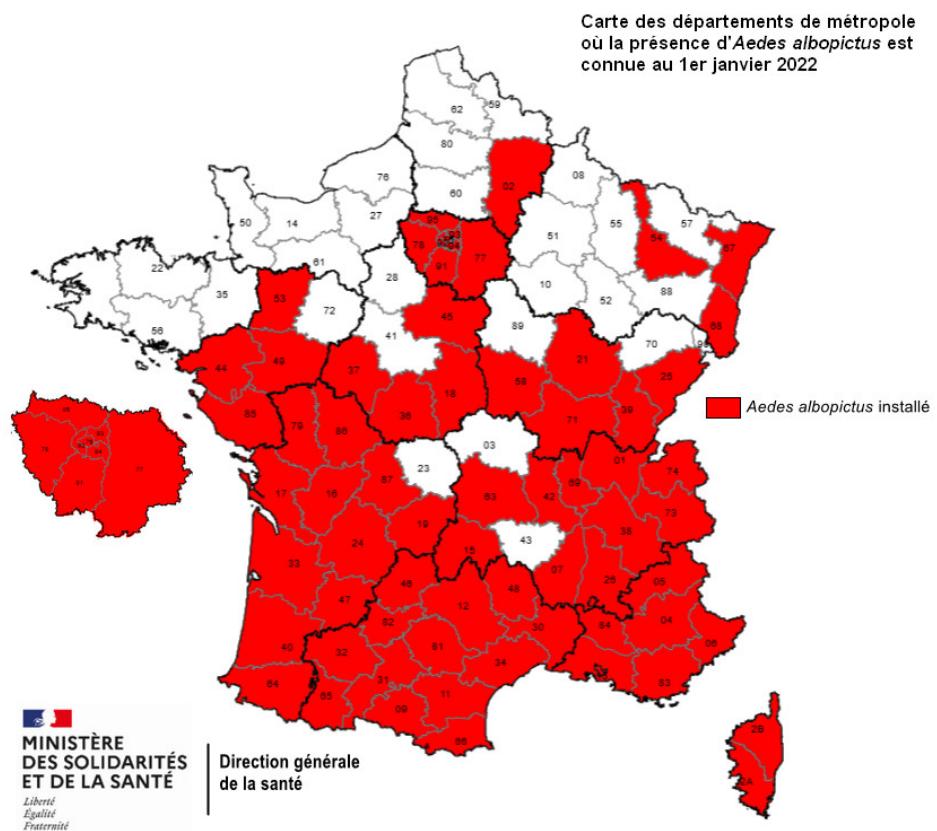


Figure 57: Présence d'*Aedes albopictus* dans les départements de métropole depuis le 1<sup>er</sup> janvier 2022 (146)

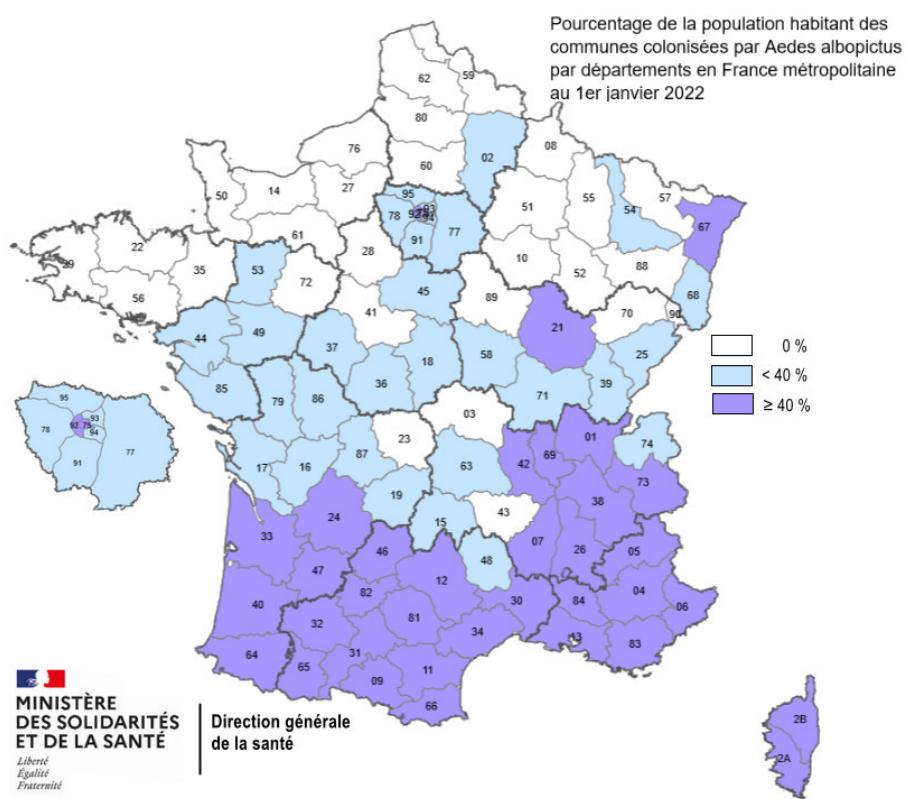


Figure 58 : Pourcentage de la population française de métropole habitant des communes colonisées par Aedes albopictus en fonction de leur département de résidence au 1<sup>er</sup> janvier 2022 (146)

## 1.2. Anthropisation des milieux

L’anthropisation désigne l’ensemble des modifications apportées à un milieu par les activités humaines telles que l’urbanisation, la déforestation, l’élevage, la culture, l’irrigation, etc. Ce processus s’inscrirait dans une nouvelle ère géologique qui serait caractérisée par un impact des activités humaines sur l’environnement supérieur aux forces géophysiques d’où le nom donné de l’ère de l’anthropocène (147). Les bouleversements écologiques découlant de l’anthropisation des milieux sont souvent à l’origine de deux phénomènes :

- Une diminution des espèces autochtones se caractérisant par une réduction de la richesse spécifique de cet environnement (148,149)
- Une augmentation des phénomènes d’introduction d’espèces exotiques envahissantes pouvant conduire à leur naturalisation (148,150)

La capacité des espèces à s’adapter à l’anthropisation va permettre de les classer en 3 types définis selon un gradient « urbain-naturel » (148,151,152) :

- Type « Urban avoider » (se traduisant par « évitateur urbain ») qui correspond à des espèces généralement autochtones qui vont disparaître d’un milieu en cas d’urbanisation de celui-ci comme par exemple les abeilles.
- Type « Urban exploiter » (se traduisant par « exploiteur urbain ») qui regroupe les espèces qui vont vivre quasi-exclusivement en zone urbaine et qui sont pour la plupart des cas introduites et souvent pré-adaptées à l’environnement urbain comme par exemple les cafards.
- Type « Urban adapter » (se traduisant par « adaptateur urbain ») qui définit les espèces autochtones ou introduites pouvant vivre dans des zones urbaines et/ou péri-urbaines. Le moustique tigre en fait partie.

Les deux principales raisons expliquant l’appartenance du moustique tigre au type « urban adapter » sont :

- Une plasticité phénotypique remarquable
- Des conditions environnementales avantageuses que nous allons détailler ci-dessous.

### 1.2.1. Apparition de nouveaux gîtes

L'urbanisation est une des causes majeures de modification du territoire français. Elle découle d'un accroissement de la population et d'un attrait pour les villes expliquant l'expansion des zones urbaines au détriment de territoires sauvages ou dédiés à la culture et l'élevage. Ce processus entraîne d'importantes modifications des paysages et notamment l'apparition de gîtes favorables au moustique tigre (153).

En fonction du stade de vie du moustique tigre, il colonise à l'état de larve des gîtes aquatiques et une fois devenu imago des gîtes de repos terrestres. Les gîtes de repos sont les lieux correspondant aux périodes où le moustique tigre n'est pas à la recherche d'un repas sanguin. Dans l'idéal, ils sont chauds, humides, ombragés et à l'abri du vent (154).

L'anthropisation des milieux offre de nombreux gîtes de repos où le moustique tigre bénéficie de conditions physiques et climatiques favorables à sa survie et à son développement. On retrouve parmi ceux-ci (153) :

- Les vides sanitaires
- Les garages
- Les abris
- Les haies
- Les aménagements extérieurs (caillebotis, mobilier de jardin, serre, etc.)

Leur diversité ainsi que leur utilité sur de courtes durées rendent leur étude et le recueil de données très compliqués.

Quant aux gîtes larvaires aquatiques d'origine anthropique, ils ont été répertoriés grâce à une enquête entomologique menée par l'EID méditerranée dont les résultats sont représentés sur le diagramme ci-dessous (fig.59) (155).

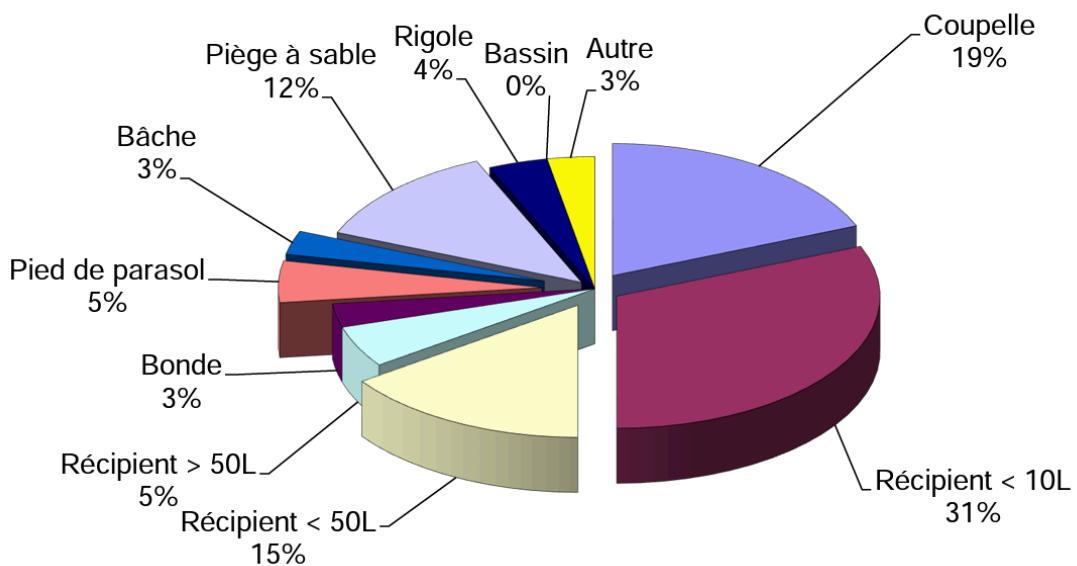


Figure 59 : Typologie des gîtes larvaires aquatiques selon l'EID méditerranée (155)

On retrouve 31% des gîtes larvaires pour des récipients de moins de 10 L. Parmi ceux-ci, on peut citer : les arrosoirs, les sceaux et les bidons qui servent au jardinage et à l'arrosage des plantes. Après leur utilisation, il reste généralement un fond d'eau suffisamment important pour permettre le cycle de vie aquatique du moustique tigre. On retrouve également des vases et des boîtes de conserve abandonnées qui du fait de leur imperméabilité vont stocker les eaux de pluie sur de longue durée. En deuxième position avec 19% on retrouve les coupelles des pots de fleurs puis en troisième position les récipients de moins de 50 L avec 15% des gîtes larvaires concernés.

Les infrastructures publiques sont également responsables de la formation de nombreux gîtes parmi lesquelles on retrouve (153) :

- Les cuves de récupération d'eaux pluviales
- Les caniveaux
- Les noues
- Les bassins de rétention
- Les réserves d'eau d'incendie
- Les fontaines
- Etc.

Du fait des activités humaines, les sols sont également transformés par l'utilisation de revêtements (béton bitumé, pavé, dalles, etc.) moins perméables que les sols naturels et plus propices à former des flaques d'eau durables en cas de fortes précipitations.

### 1.2.2. Des températures moyennes plus chaudes

Les zones urbaines sont en moyenne plus chaudes que les zones rurales avoisinantes. En région parisienne, cette différence est de 2,5°C et peut atteindre 10°C pendant les périodes de canicule. Plusieurs phénomènes y participent (fig.60) :

- Un sol qui émet plus de rayonnement infrarouge et l'air en surface qui accumule plus de chaleur
- Un plus grand nombre d'activités humaines émettrices de chaleur
- Une évapotranspiration moindre
- Des infrastructures qui vont limiter les mouvements d'air

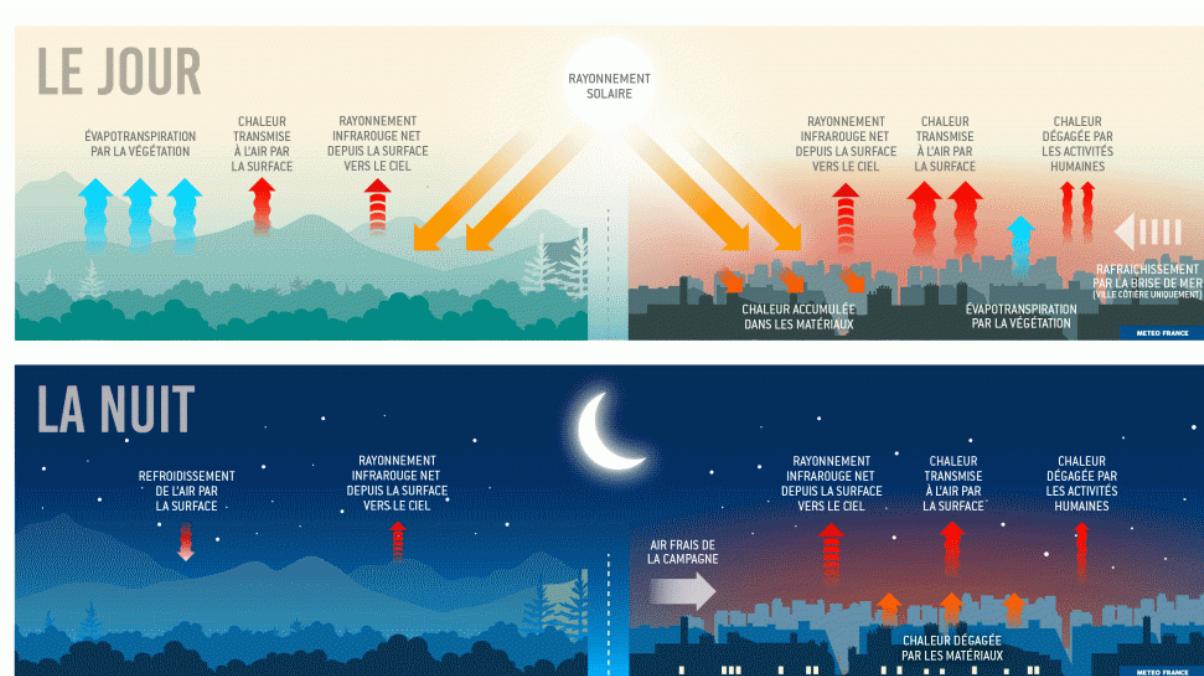


Figure 60 : Comparaison des flux de chaleurs entre les zones rurales et les zones urbaines de jour et de nuit (156)

Or pour effectuer son cycle de développement, le moustique tigre a besoin dans l'idéal de température allant de 10 à 30°C. Lorsque ces conditions ne sont pas remplies comme en hivers où la température moyenne de l'hexagone est de 5,4°C, les œufs vont entrer en dormance

pour se protéger (157). Plus les températures vont être comprises dans l'intervalle de 10 à 30°C une grande partie de l'année, plus le cycle de développement va se réaliser et permettre la survie de l'espèce. L'anthropisation des milieux participe donc à créer des conditions thermiques qui favorisent la survie d'*Aedes albopictus* pendant la période critique hivernale, ce qui explique son attrait pour les zones urbaines et péri-urbaines (158).

### **1.2.3. Bouleversement de la biodiversité lié aux activités humaines**

Dans « *De l'origine des espèces* », Charles Darwin conceptualise le phénomène de sélection naturelle. C'est un processus universel s'appliquant à toutes les espèces vivantes, sélectionnant les individus les mieux adaptés à un environnement, afin de permettre la survie de l'espèce.

De ce processus découle la théorie de la Reine Rouge conceptualisée par Leigh Van Valen, décrivant une course sans fin à l'adaptation pour survivre. Le nom de cette théorie vient du célèbre roman de Lewis Carrol « *Alice au pays des merveilles* » où la Reine rouge explique à Alice : « ici, vois-tu, on est obligé de courir tant qu'on peut pour rester au même endroit ». Le moustique tigre est un parfait exemple de réponse adaptative d'une espèce à un environnement subissant d'importants changements.

Une étude de 2004 démontrait que les activités humaines et l'anthropisation des milieux qui en découlent seraient à l'origine d'une érosion de la biodiversité facilitant l'introduction d'espèces invasives mieux adaptées aux nouvelles conditions créées et/ou ayant une meilleure résilience aux variations environnementales. C'est ce que l'on appelle « l'opportunité de niche » (159,160).

Cependant de plus en plus de scientifiques s'accordent pour dire qu'il n'y a pas systématiquement une relation de cause à effet entre altération du milieu et introduction d'espèces invasives mais plus une concurrence (160). En fait les espèces invasives vont avoir une facilité de naturalisation sur des niches écologiques laissées vacantes par des espèces endémiques répondant à un modèle dit de la « chaise vide » (160).

Dans le cadre de notre sujet, *Aedes albopictus* bénéficie par conséquent de 2 processus facilitant sa naturalisation ainsi que son expansion sur le territoire métropolitain Français. Tout d'abord, une érosion des populations de prédateurs comme les insectes, les mammifères (chauves-souris), les poissons et les oiseaux (161). Pour illustrer, l'importance de la pression

exercée par les prédateurs, il faut savoir qu'une chauve-souris peut consommer en moyenne 3000 moustiques par nuit et aller jusqu'à l'équivalent de la moitié de son poids (162).

L'autre processus est la disparition d'espèces autochtones consécutive à l'anthropisation des milieux laissant vacantes certaines niches environnementales que le moustique tigre peut occuper.

#### 1.2.4. Une concentration des populations humaines hôtes

Depuis le milieu du 20<sup>ème</sup> siècle, la population Française ne cesse d'augmenter et conjointement à ce phénomène, on remarque une augmentation de la part de la population vivant en zone urbaine (fig.61).

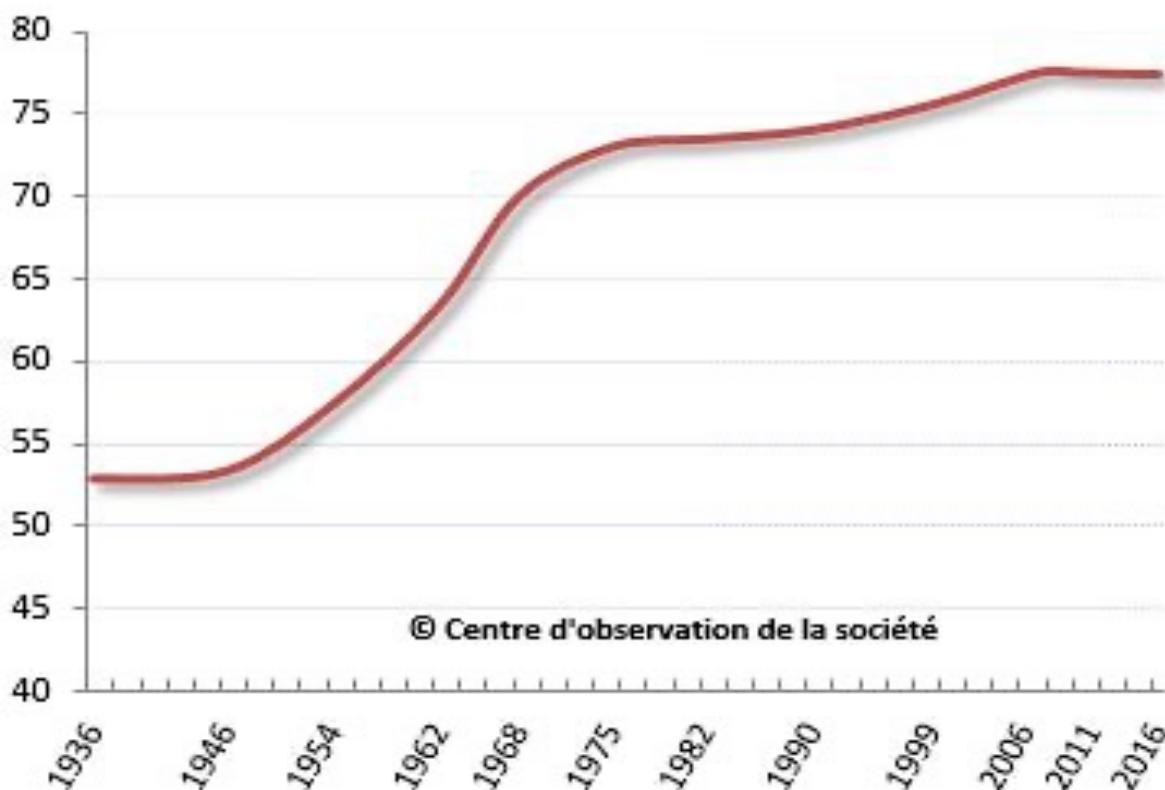


Figure 61 : Evolution de la population urbaine en France métropolitaine depuis 1936 (en %) (163)

Cette dynamique a entraîné un bouleversement dans l'utilisation des territoires. On voit ainsi une diminution des surfaces dédiées à l'agriculture, une stagnation des surfaces naturelles et une augmentation des surfaces artificialisées témoins de l'accroissement des villes et de leurs périphéries. La figure 62 illustre cette évolution et l'importance du processus d'anthropisation des milieux.

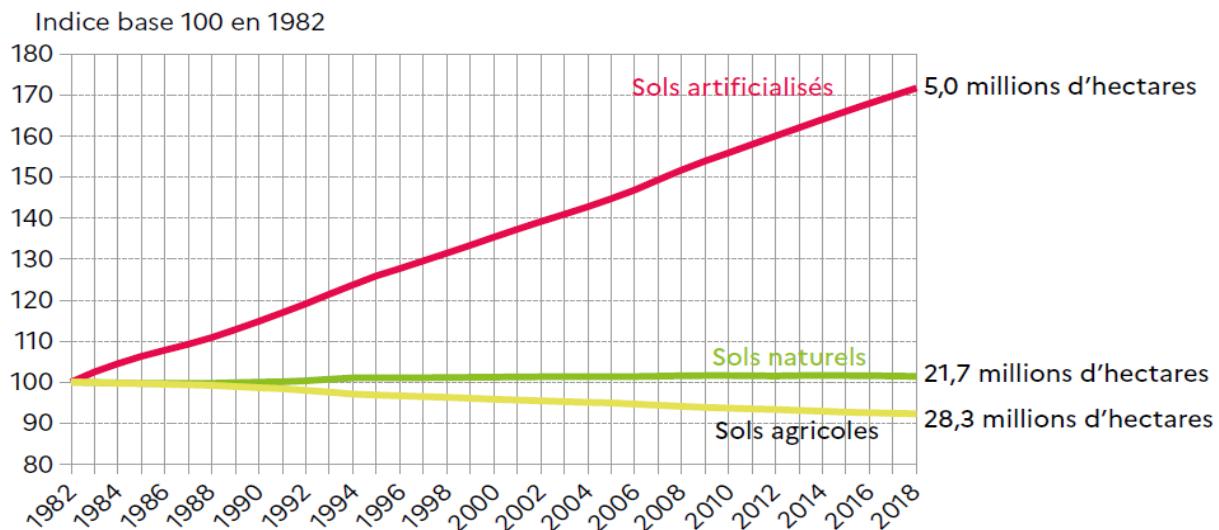


Figure 62: Evolution des superficies selon le type d'occupation du sol en France métropolitaine de 1982 à 2018 (164)

En lien avec l'agrandissement des villes, on assiste à une concentration des populations dans les zones urbaines et péri-urbaines. Ainsi plus de 40% de la population française vit dans des villes d'au-moins 200 000 habitants (Tableau 4).

Tableau 4 : Répartition de la population française en 2017 selon la taille de l'unité urbaine (165)

	Population	Proportion (en %)	Nombre d'unités urbaines	Nombre de communes
Agglomération de Paris	10 785 092	16,1	1	411
200 000 à 1 999 999 habitants	16 824 170	25,2	35	1 325
100 000 à 199 999 habitants	3 819 001	5,7	26	333
50 000 à 99 999 habitants	5 052 310	7,6	72	641
20 000 à 49 999 habitants	4 358 378	6,5	144	813
10 000 à 19 999 habitants	3 368 678	5,0	242	798
5 000 à 9 999 habitants	4 225 139	6,3	612	1 268
2 000 à 4 999 habitants	4 428 918	6,6	1 335	1 991
Hors unité urbaine	13 919 171	20,8	///	27 388
<b>Ensemble</b>	<b>66 780 857</b>	<b>100,0</b>	<b>2 467</b>	<b>34 968</b>

/// : absence de résultat due à la nature des choses.

Lecture : 4 428 918 habitants, soit 7 % de la population française, vivent dans les 1 991 communes qui composent les 1 335 unités urbaines de 2 000 à 4 999 habitants.

Champ : France.

Source : Insee, recensement de la population 2017, unités urbaines 2020.

Le moustique tigre par son caractère anthropophile recherche la proximité de l'humain. Ainsi la densité de population des grandes agglomérations garantit un accès rapide au repas sanguin indispensable au cycle de développement d'une nouvelle génération de moustiques. Plus le nombre d'êtres humains dans une zone va être important, plus la probabilité qu'une femelle moustique hématophage réussisse son repas sanguin augmente. Ce processus de concentration des populations dans des unités urbaines facilite donc l'endémisation et la survie d'*Aedes albopictus*.

## 2. Rôle du changement climatique sur l'endémisation d'*Aedes albopictus* et le développement d'arboviroses

### 2.1. Changement climatique et maladies infectieuses

Le changement climatique va impacter le risque épidémique en modifiant les facteurs physiques (ensoleillement, précipitation, humidité) et va altérer les conditions de vie des êtres humains (fig.63). Ceci va concourir à l'endémisation du moustique tigre en France métropolitaine et ainsi augmenter les risques épidémiques.

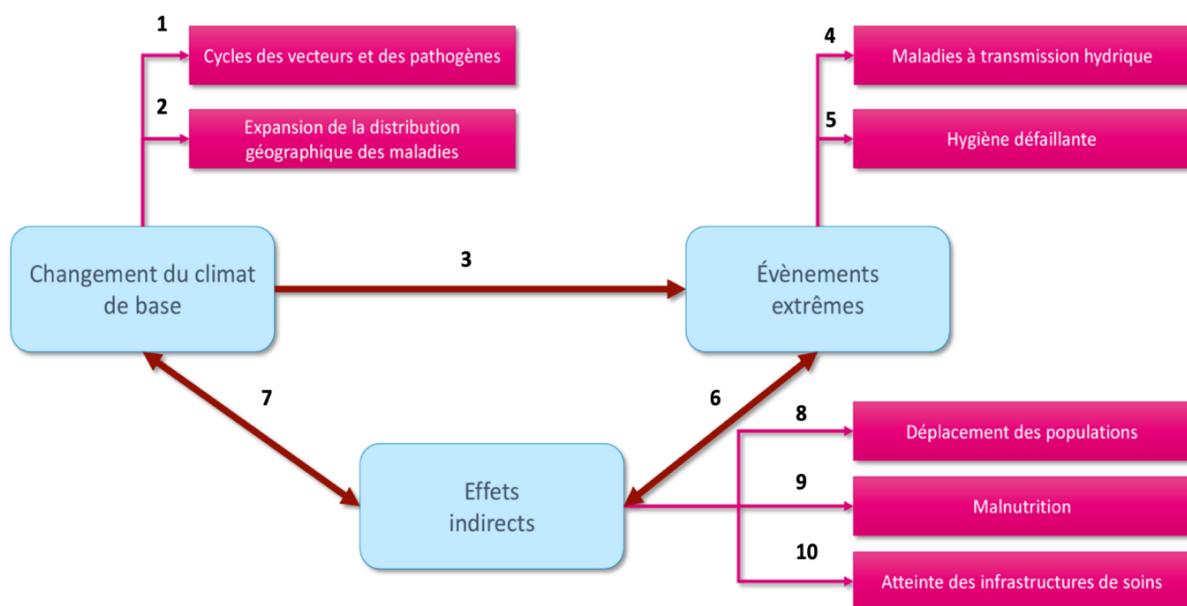


Figure 63 : Relation entre le changement climatique et ses répercussions chez les humains (maladies, nutrition, conditions de vie) (166)

En 1, le changement climatique impacte directement le cycle de vie des pathogènes et de leur vecteur de manière positive ou négative pour l'homme (167). Dans le cas du moustique tigre, l'effet sera négatif pour les humains.

En 2, il entraîne une expansion des maladies via une redistribution des vecteurs (166).

En 3, il conduit à l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements climatiques extrêmes (tempêtes, inondations, sécheresses, etc.) (166).

En 4, les phénomènes extrêmes perturbent les réserves d'eau ainsi que leur gestion par les populations locales. Les inondations peuvent être responsables de la transmission de maladies liées à l'eau telles que le choléra ou la leptospirose (168). Les conséquences sanitaires de ces inondations sont corrélées à la capacité des régions touchées à gérer l'eau que ce soit pour

son traitement ou son évacuation. Elle est souvent corrélée au niveau économique des pays, les zones pauvres étant particulièrement touchées par ces événements.

En 5, A contrario, les sécheresses vont rendre très difficile l'accès à l'eau et entraîner un manque d'hygiène rendant les populations plus sensibles à certaines infections notamment cutanées (166).

En 6 et 7, les événements extrêmes ainsi que le changement du climat de base vont indirectement affecter les conditions de vie des êtres humains de diverses manières (166) :

- 8, ils vont être à l'origine de grandes migrations d'humains quittant les zones sinistrées pour trouver refuge sous d'autres latitudes plus propices à leur vie. Ces déplacements de populations vont souvent être associés au transfert de pathogènes et de leurs vecteurs vers des régions parfois jusqu'alors préservées (166).
- 9, on retrouve également la malnutrition qui découle des modifications climatiques. Celles-ci à l'origine de la destruction des récoltes provoquant des pénuries alimentaires ou de cultures devenues impossibles dans certaines régions du globe. Cette malnutrition va affaiblir les populations, les rendant plus sensibles aux maladies infectieuses (169).
- 10, ils vont être la cause de la destruction des infrastructures dont celles de soins avec des répercussions sur les dispositifs de prévention et de lutte contre les maladies. La détérioration des services sanitaires est corrélée avec le niveau économique de la zone atteinte, les zones les plus pauvres subissant plus durement ces effets (170).

## 2.2. Changement climatique, *Aedes albopictus* et arboviroses

L'environnement, le vecteur et les virus forment un triptyque interconnecté dont les relations sont dans un équilibre dynamique. D'une part, il y a un environnement qui est le siège de nombreux changements induisant de nombreuses mutations, qui d'autre part modifient sans cesse les interactions qui les lient. La figure 64 illustre ces interactions que nous extrapolerons au cas du moustique tigre et des arbovirus qu'il transmet (171).

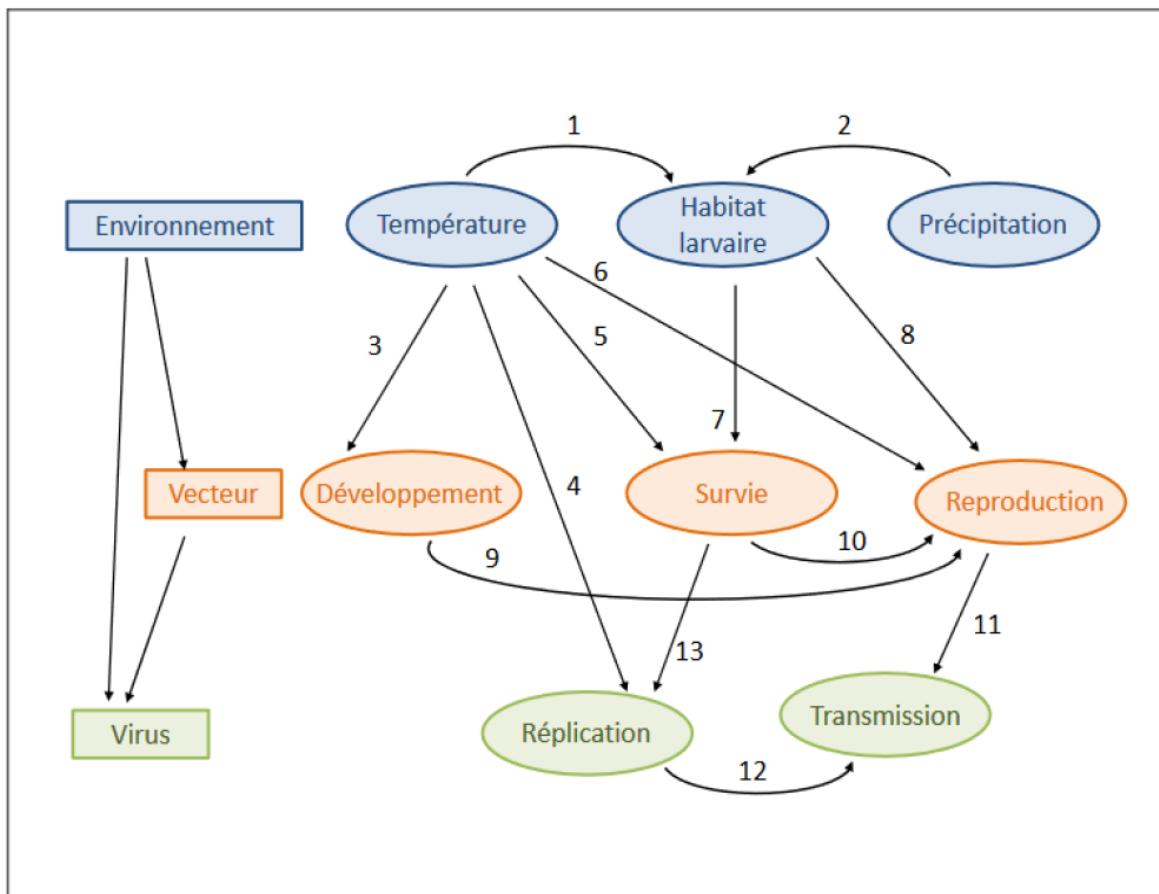


Figure 64 : Diagramme des interactions entre des variables climatiques, les vecteurs et les virus (171)

Lors de la phase pré-imaginale, les stades évolutifs du moustique tigre se déroulent en milieu aquatique. La température environnementale est un facteur primordial dans le développement larvaire. En influant sur les phénomène d'évaporation et d'éco-transpiration, la température va jouer un rôle sur la disponibilité des habitats larvaires (1). Une température trop froide empêche la formation de réserve d'eau à l'état liquide. A contrario, des températures trop chaudes vont assécher ces réserves. La température va également agir sur le développement (3), la survie (5) et la reproduction (6) d'*Aedes albopictus*, et va réguler la réplication des arbovirus infectant les moustiques (4). Les précipitations vont quant à elles augmenter le nombre de gîtes larvaires (2). La disponibilité en gîtes larvaires va être indispensable à la survie de l'espèce. Sans ceux-ci, il ne peut pas y avoir de cycle de vie pour

le moustique tigre, ce qui explique son absence des zones désertiques chaudes comme le Sahara (7). La présence des gîtes larvaires va être aussi nécessaire pour la reproduction des imagos (8). Des conditions favorisant le développement et la survie de l'espèce vont nécessairement faciliter l'accès aux partenaires sexuels et ainsi faciliter la reproduction (9 et 10). Une reproduction accrue, augmente le nombre de moustiques dans une population et augmente indirectement le nombre de repas sanguin, ce qui majore le risque de transmission d'arboviroses (11). Ce risque est d'autant plus majoré que dans des conditions idéales, la vitesse des cycles réplicatifs s'accélère et la période d'incubation extrinsèque se raccourcit (12). A cela s'ajoute, une augmentation de la durée de vie du vecteur permettant une réplication du virus plus importante (13).

### **2.2.1. Température et écologie vectorielle**

La température de l'environnement est un facteur physique majeur pour le développement d'*Aedes albopictus*. Son appartenance au groupe des poikilothermes, espèce vivante dont la température corporelle dépend de celle de l'environnement, explique l'importance de ce facteur pour mieux comprendre l'impact des changements physiques de l'environnement sur le comportement du moustique tigre.

#### **a) Le vol et la recherche d'hôtes**

Les recherches qui ont été effectuées sur l'effet de la température sur le vol et la recherche d'hôte concernaient principalement l'espèce *Aedes aegypti*. Chez cette espèce, la limite d'activité a été définie à 10°C en-dessous de laquelle le froid engourdit les moustiques et bloque leur capacité de vol (172).

En ce qui concerne l'activité hématophage du moustique, elle dépend du comportement de la femelle. Une étude a montré que la femelle *A. aegypti* peut voler de manière durable entre 15 et 32°C tandis qu'à des températures plus extrêmes c'est-à-dire en-dessous de 10°C et au-dessus de 35°C, leur capacité de vol se limite à de courtes périodes (173). Les performances de la femelle moustique étant optimales à des températures aux alentours de 27°C, ceci explique leur appétence pour les repas sanguins aux heures les plus fraîches (en début de matinée ou fin d'après-midi). L'impact de la température sur la fréquence des battements des ailes du moustique a également été étudié chez *A. aegypti* pour laquelle on a mesuré 367 battements par seconde à 18°C contre 427 à 25°C (174).

D'autres études ont montré que les conditions optimales pour la prise du repas sanguin par la femelle *A. aegypti* ainsi que la durée dépendaient étroitement de la différence entre la température extérieure et la température de l'hôte (174,175).

De telles études n'ont pas été menées chez *Aedes albopictus* mais on peut raisonnablement extrapoler les résultats à cette espèce puisque ces deux moustiques appartiennent au même genre *Aedes*.

### **b) Le cycle de développement et dynamique des populations**

Dans une étude effectuée sous températures contrôlées, il a été montré qu'*Aedes albopictus* pouvait effectuer son cycle de développement jusqu'à une température critique minimale de 10,4°C et que celui-ci était optimale à 29,7°C (176). La vitesse de développement des immatures est également thermosensible. Elle est la plus courte à 30°C avec une moyenne de 8,8 jours. De cette même étude découle une croissance optimale comprise entre 25 et 30°C (176). Il a été constaté que le cycle gonotrophique est également optimal à ces températures. Ces valeurs peuvent varier en fonction de la zone géographique et de la population vectorielle étudiée. Cependant, il ressort que la capacité de survie et de développement d'*Aedes albopictus* dépend de températures plus froides que pour *A. aegypti*. Dans une étude datant de 1994 qui portait sur des œufs de différentes populations de moustique tigre, la capacité de survie des œufs a été étudiée en fonction de différentes zones géographiques. Il en a résulté une meilleure tolérance au froid des œufs issus du Nord de l'Amérique vis-à-vis de ceux provenant de Floride (177). Cela montre une grande adaptabilité du moustique tigre à des conditions climatiques différentes et notamment plus fraîches, et par conséquent une forte capacité à coloniser des territoires se situant à des latitudes septentrionales. En transposant ces informations à la France métropolitaine, on en déduit que l'augmentation des températures annuelles est un facteur favorisant le cycle de développement et donc la survie du moustique tigre sur le territoire métropolitain. Une étude en 2014 au Japon a montré que la hausse accélérée des températures depuis le milieu des années 80 avait permis une implantation d'*Aedes albopictus* dans les régions nord du Japon. Ce changement s'explique par une période d'hivernage moins froide et plus courte, ainsi qu'une augmentation des températures pendant la période de reproduction (178).

Les températures vont également avoir un rôle sur les échanges d'eau (évaporation, précipitations) et donc sur l'hygrométrie ambiante.

## 2.2.2. Précipitations et écologie des vecteurs

La phase aquatique du développement d'*Aedes albopictus* dépend des réserves d'eau douce liées aux précipitations. Sans précipitations, ces réserves se réduisent jusqu'à disparaître empêchant la ponte des œufs et interrompant ainsi le cycle de développement du moustique tigre.

Une étude en laboratoire datant de 2001 a montré que ce n'était pas l'intensité ou la fréquence des précipitations qui avaient un impact sur la ponte mais la présence continue d'eau dans le gîte larvaire (179). Ainsi en conditions expérimentales, les précipitations étaient matérialisées par le remplissage de la cuve contenant les œufs *d'Aedes albopictus*. Plus il pleuvait, plus la cuve était censée se remplir. Les recherches ont montré que le nombre d'individus atteignant le stade adulte était très sensiblement le même que la cuve soit totalement ou peu remplie. La seule condition ayant un impact négatif sur le développement des larves était l'absence de précipitations jusqu'à un assèchement total de la cuve.

En extrapolant aux conditions climatiques métropolitaines, on pourrait s'attendre à ce que dans les régions du Nord il y ait un effet moindre des précipitations sur la taille des populations d'adulte. En effet, l'humidité est plus ou moins constante, ce sont alors les températures plus fraîches qui vont être le principal facteur limitant, le moustique tigre étant très sensible aux températures basses. A ces températures, l'évaporation reste très limitée ce qui évite l'assèchement des réserves d'eaux douces. A contrario dans les régions plus chaudes sujettes aux sécheresses, le rôle des précipitations va être très important dans le maintien des réserves d'eau. Si les conditions sont chaudes mais ne conduisent pas à un assèchement total des réserves d'eau, les conditions de développement du moustique tigre sont alors optimales et conduiront à un plus grand nombre d'adultes.

## 2.2.3. Climat, habitat et écologie des vecteurs

Comme nous l'avons vu précédemment, le climat va influencer de manière directe et indirecte la taille des populations du moustique tigre sur un territoire (171).

Ainsi, il est évident que le changement climatique va impacter le triptyque « Humain-Vecteur-Arbovirus » en modifiant un environnement déjà transformé par les activités humaines. Ces changements ont des répercussions sur la taille des populations de moustiques et sur le risque de transmission des virus aux humains (fig.65) (180).

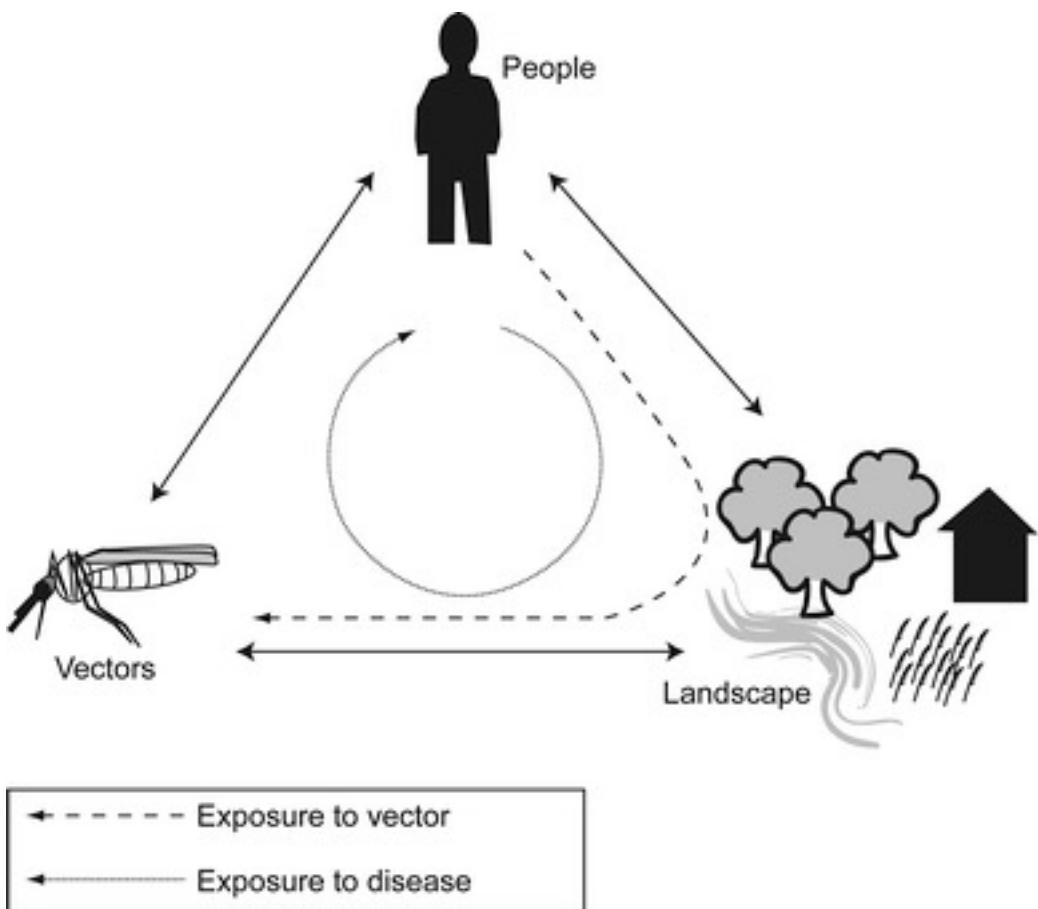


Figure 65 : Modèle théorique reliant les personnes, les paysages et les moustiques (180)

### a) **Humains et paysages**

Les contraintes des paysages vont définir les activités humaines pouvant s'y dérouler puis ces mêmes activités vont modeler l'environnement. Par exemple, des surfaces non-constructibles vont être laissées en friches ou dédiées à l'agriculture. A contrario, des terres constructibles situées à proximité d'activités économiques vont être aménagées pour permettre leur développement (habitations, routes, etc.)(180). Dans une revue de 1982, on montrait ainsi en quoi l'évolution des activités humaines au cours du temps avait conduit à une métamorphose des paysages de la vallée du Haut-Rhône (181).

Ces activités impliquent des mouvements de population qui vont soit avoir un effet protecteur en limitant l'interaction entre hôte et vecteur, soit avoir un effet néfaste en exposant l'Homme au moustique tigre. Par exemple, des régions parcourues par de nombreux plans d'eau sont favorables à la pratique de la pêche. Cette activité va attirer des personnes vers des zones ayant une importante densité de moustique à des moments où la femelle se nourrit (sortie du travail par exemple). Cette activité est donc plus à risque de transmission d'arbovirose.

## b) Paysages et moustiques

L'habitat d'un vecteur et sa répartition sur un territoire dépendent de sa capacité à se déplacer mais également de ses préférences d'habitat. L'utilisation des terres et donc leur modification vont être plus ou moins favorables à la présence de gîtes larvaires (180,182). Les 2 exemples suivant illustrent cette relation entre type de paysage et présence du moustique :

- L'assèchement de zones marécageuses pour la construction d'une zone industrielle va entraîner une destruction des gîtes larvaires et ainsi diminuer les populations de moustiques
- La construction d'un lotissement va multiplier les sites de ponte pour les moustiques qui pourront se propager en empruntant les moyens de transport utilisés par les humains.

## 2.3. Projection sur le changement climatique et la présence du moustique tigre

Aujourd’hui, sur le territoire européen, le moustique tigre est essentiellement présent sur le pourtour méditerranéen et dans certaines régions périphériques de la mer Noire (fig.66) (183). Cependant depuis les années 2000, son territoire s’étend de plus en plus vers le nord de l’Europe à l’image de ce qui se passe en France métropolitaine.

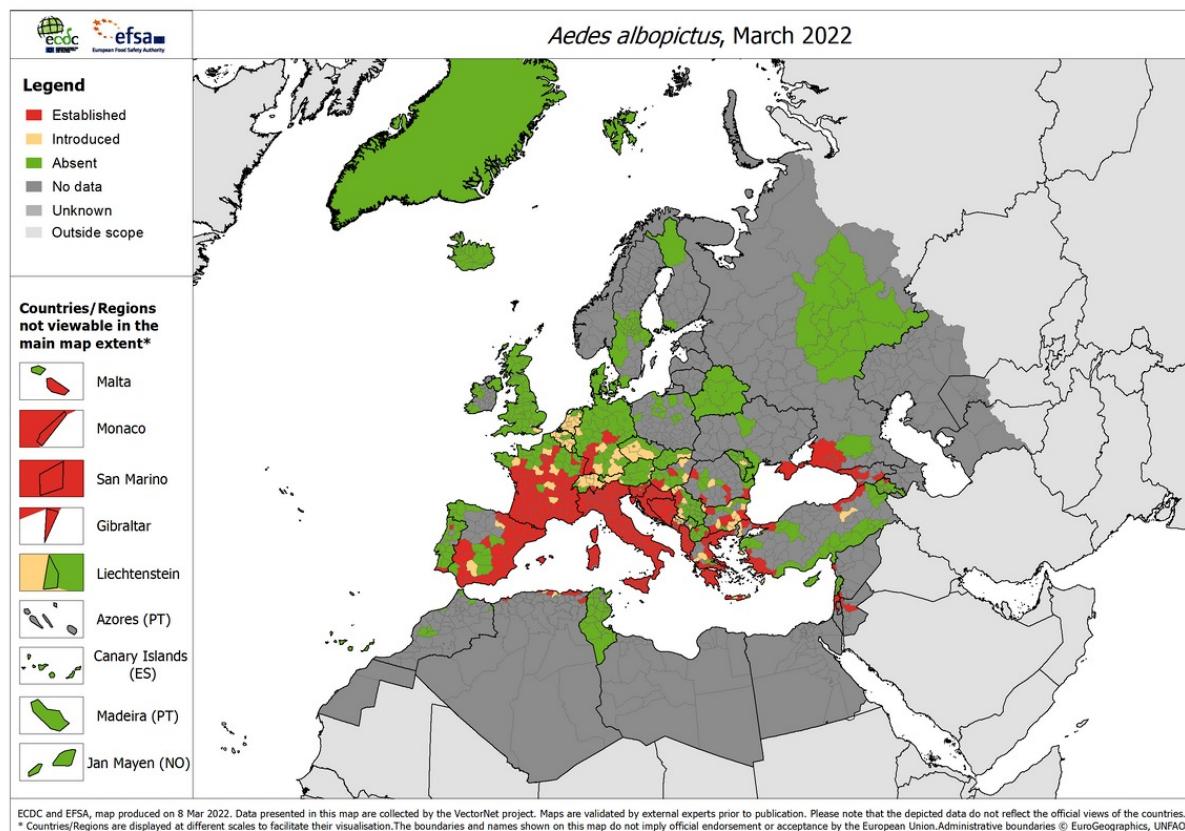


Figure 66 : Présence du moustique tigre en Europe en mars 2022 (183)

En 2015, une étude a tenté de prédire en Europe les zones d’habitat potentielles qu’occupera le moustique tigre pour la période 2045-2054 (fig.67). La simulation repose sur le scénario SSRES – A2 émis par le GIEC. Elle décrit un monde très hétérogène où l’autosuffisance et la préservation des identités locales conduisent à une très lente convergence vers des systèmes favorisant une fécondité inter-régionale. Ce modèle conduit à une partition du monde où certaines populations humaines ont un important développement économique et technologique tandis que d’autres n’en bénéficient pas. Les écarts sociaux-économiques s’accentuent à l’extrême. Son équivalent est le scénario RCP 8.5 ou SSP5 8.5 conduisant à une augmentation du forçage radiatif à au moins  $8.5 \text{ W.m}^{-2}$  d’ici 2100 soit le scénario le plus pessimiste.

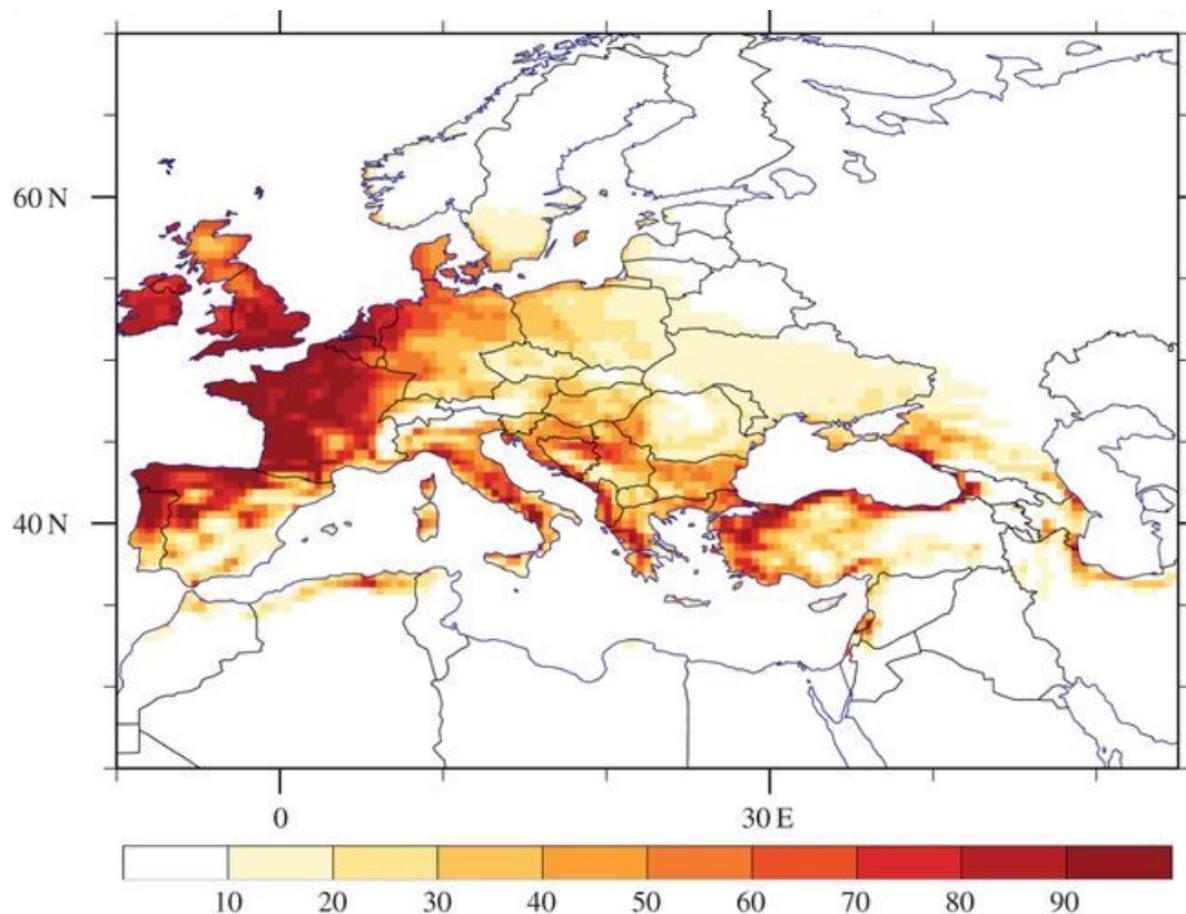


Figure 67 : Simulation de la présence d'*Aedes albopictus* en Europe sur la base de projections climatiques futures pour la période 2045-2054 (scénario A2 issu du GIEC) (184)

Dans un monde où ces projections se réaliseraient, le moustique tigre quitterait progressivement le pourtour du bassin méditerranéen pour s'installer essentiellement en Europe de l'ouest et en particulier dans le Royaume-Uni et en France. Cette zone occidentale deviendrait le point chaud de l'Europe. Dans les régions du sud de l'Europe, les fortes températures provoqueraient des sécheresses de plus en plus longues et intenses, conduisant au départ d'*Aedes albopictus* vers les régions sous influence climatique de type océanique, la proximité de l'océan garantissant des précipitations tout au long de l'année.

Dans ce scénario, le risque d'implantation du moustique tigre dans les régions continentales de l'Europe resterait minime. En effet, malgré une augmentation des températures annuelles, les températures hivernales seraient encore trop négatives pendant une partie de l'année pour que la survie du moustique tigre soit assurée.

### 3. Arboviroses émergentes en France métropolitaine

En réponse à l'implantation du moustique tigre sur l'hexagone en 2004, le ministère français chargé de la santé a lancé en 2006 le plan anti-dissémination de la dengue et du chikungunya en métropole. Ce plan avait 3 principaux objectifs (185) : Prévenir le risque d'importation et de dissémination des arboviroses, intervenir rapidement pour les cas humains d'arboviroses afin de limiter la propagation et intervenir aux côtés du Préfet pour la gestion des éventuelles épidémies dans le cadre du dispositif ORSEC.

En 2016, s'est ajouté la surveillance du Zika dont les 3 premiers cas autochtones sont apparus en France en 2019 (186). Ce plan a permis d'obtenir deux données principales : le nombre de cas importés et de cas autochtones classés par région, par période de l'année et la corrélation à la présence ou non du moustique tigre en fonction des régions. Les mesures de surveillance ont été renforcées du 1<sup>er</sup> mai au 30 novembre, période d'activité d'*Aedes albopictus*. Le nombre de cas importés étant fortement dépendant de l'activité épidémique hors de l'hexagone, c'est l'évolution du nombre de cas autochtones depuis 2010 (fig.68) qui inquiète particulièrement les autorités sanitaires par le fait qu'elle est le reflet de l'extension de ces arboviroses en France métropolitaine.

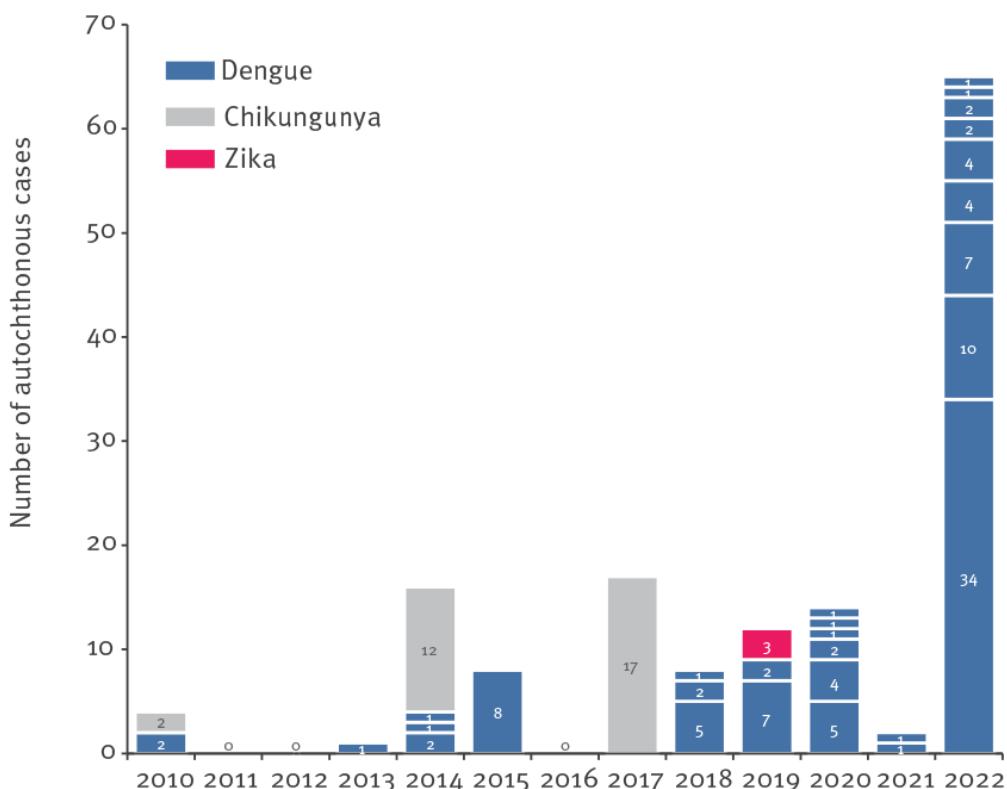


Figure 68 : Nombre de cas autochtones de dengue, chikungunya et Zika enregistrés de 2010 à 2022 en France métropolitaine (187)

Les zones de transmission concernent principalement le sud de la France où les températures plus chaudes garantissent des conditions idéales pour la réplication virale ainsi que pour le développement du moustique (Tableau 5) (188). La transmission autochtone de ces pathologies est d'autant plus à risque que ces régions comportent d'importantes agglomérations à haute densité de population.

Tableau 5 : : Emergence des virus dengue, chikungunya et Zika en France métropolitaine

Années	virus	ville	Nombre de cas
<b>2010</b>	Dengue	Nice (06)	2
<b>2010</b>	<b>Chikungunya</b>	<b>Fréjus (83)</b>	<b>2</b>
<b>2013</b>	Dengue	Venelles (13)	1
<b>2014</b>	Dengue	Toulon (83)	1
<b>2014</b>	Dengue	Toulon (83)	1
<b>2014</b>	Dengue	Aubagne (13)	2
<b>2014</b>	<b>Chikungunya</b>	<b>Montpellier (34)</b>	<b>12</b>
<b>2015</b>	Dengue	Nîmes (30)	8
<b>2017</b>	<b>Chikungunya</b>	<b>Cannet des Maures / Taradeau (83)</b>	<b>17</b>
<b>2018</b>	Dengue	Saint-Laurent-du-Var (06)	5
<b>2018</b>	Dengue	Clapiers (34)	2
<b>2018</b>	Dengue	Nîmes (30)	1
<b>2019</b>	Dengue	Cahors (46)	1
<b>2019</b>	Dengue	Vallauris (06)	7
<b>2019</b>	Dengue	Caluire (69)	2
<b>2019</b>	<b>Zika</b>	<b>Hyères (83)</b>	<b>3</b>
<b>2020</b>	Dengue	Cessenon-sur-Orb (34)	1
<b>2020</b>	Dengue	Nice (06)	5
<b>2020</b>	Dengue	La Croix-Valmer (83)	2
<b>2020</b>	Dengue	Saint-Jean-de-Valériscle (30)	1
<b>2020</b>	Dengue	Saint-Laurent-du-Var (06)	2
<b>2020</b>	Dengue	Montpellier (34) ou Cabrières (30)	1

Aujourd’hui si le risque épidémique reste faible et limité au sud de la France, l’évolution positive des températures annuelles va favoriser son extension sur l’hexagone.

# Conclusion

Au regard de l'extension du territoire du moustique tigre, son implantation sur l'ensemble de l'hexagone ne semble plus qu'être une question de temps. La présence de ce vecteur expose les français à un risque accru de contamination par des arboviroses comme le Zika, la dengue et le chikungunya. Le fait que ces pathologies reposent sur un triptyque : vecteur, hôte, virus, dans des écosystèmes en pleine mutation complique la projection que l'on peut faire sur leur évolution et les réponses à apporter dans la lutte que l'on a à mener contre ces arboviroses.

Le cas du moustique tigre n'est qu'un exemple parmi tant d'autres sur le rôle délétère que peuvent jouer les activités humaines sur les écosystèmes et dans le dérèglement climatique avec des conséquences non négligeables sur la santé humaine. Afin d'assurer la sécurisation de la santé des êtres humains de demain, la nécessité d'une approche globale des risques prenant en compte le changement climatique est essentielle et doit reposer sur une approche pluridisciplinaire.

Ainsi le concept « One Health » se traduisant par « Une seule Santé » en français, s'inscrit pleinement dans cette dynamique. Il est issu du travail collaboratif entre trois organismes internationaux : l'organisation mondiale de la santé (OMS), l'organisation des nations-unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) et l'organisation mondiale de la santé animale (OIE). Il encourage la collaboration entre les secteurs de la santé humaine, de la santé animale et de la santé des écosystèmes pour comprendre et prévenir les risques encourus par les êtres humains concernant leur santé (189–191).

Les efforts réalisés ces dernières années pour encourager l'inter professionnalisation dans le monde de la santé, en particulier à la faculté de santé d'Angers, constituent un premier pas dans cette démarche. Son extension vers d'autres professionnels comme les vétérinaires, les écologues, les biologistes de la conservation devra être une piste à développer dans l'avenir.

De par ses connaissances scientifiques et son expertise en santé humaine, le pharmacien d'officine est un professionnel à même de pouvoir participer à la construction d'une approche plus globale de la santé publique. Son implication dans le concept « One Health » est donc primordiale et complémentaire de ses missions d'information et de prévention des populations.

## Bibliographie

1. Jancovici JM. Où nous situons-nous dans l'échelle des températures par rapport au passé ? [Internet]. [cité 9 janv 2023]. Disponible sur: <https://jancovici.com/changement-climatique/predire-lavenir/ou-nous-situons-nous-dans-lechelle-des-temperatures-par-rapport-au-passe/>
2. Ministère des solidarités et de la santé. Cartes de présence du moustique tigre (Aedes albopictus) en France métropolitaine - Ministère de la Santé et de la Prévention [Internet]. [cité 27 sept 2022]. 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>
3. Avenas P. Étymologie :À propos de climat et énergie. La Jaune et la Rouge [Internet]. 24 déc 2018 [cité 12 déc 2021]; Disponible sur: <https://www.lajauneetlarouge.com/a-propos-de-climat-et-energie/>
4. Decrouy A. 11 types de climat dans le monde et leurs caractéristiques [Internet]. [cité 12 déc 2021]. Disponible sur: <https://www.projetecolo.com/les-climats-dans-le-monde-270.html>
5. Conner D. Les Microclimats De San Francisco | 2022 [Internet]. fr.ripleybelieves.com. [cité 12 déc 2021]. Disponible sur: [/fr.ripleybelieves.com/microclimates-of-san-francisco-3893](http://fr.ripleybelieves.com/microclimates-of-san-francisco-3893)
6. Universalis E. Climats [Internet]. Encyclopædia Universalis. [cité 29 août 2022]. Disponible sur: <https://www.universalis.fr/encyclopedie/climats-notions-de-base/>
7. Volver P. Le Soleil - Vie et mort d'une étoile [Internet]. Destination Orbite. 2017 [cité 23 févr 2022]. Disponible sur: <https://destination-orbite.net/astronomie/systeme-solaire/le-soleil-vie-et-mort-d'une-etoile>
8. Éditions L fr. L'énergie solaire inégalement répartie sur Terre | Lelivrescolaire.fr [Internet]. [cité 29 août 2022]. Disponible sur: <https://www.lelivrescolaire.fr/page/6709464>
9. L'énergie solaire, la biomasse et les combustibles fossiles - 2nde - Cours SVT - Kartable [Internet]. [cité 29 août 2022]. Disponible sur: <https://www.kartable.fr/ressources/svt/cours/lenergie-solaire-la-biomasse-et-les-combustibles-fossiles/18928>
10. Le rayonnement solaire - 1ère - Cours Enseignement scientifique - Kartable [Internet]. [cité 29 août 2022]. Disponible sur: <https://www.kartable.fr/ressources/enseignement-scientifique/cours/le-rayonnement-solaire/51271>
11. Centre d'information sur l'eau. L'eau dans l'Univers [Internet]. 2018 [cité 12 févr 2022]. Disponible sur: <https://www.cieau.com/connaitre-leau/connaitre-leau/leau-dans-lunivers/>
12. Macé M. Le cycle de l'eau : le voyage de l'eau à travers la Terre | Centre d'information sur l'eau [Internet]. 2017 [cité 12 févr 2022]. Disponible sur: <https://www.cieau.com/espace-enseignants-et-jeunes/les-enfants-et-si-on-en-apprenait-plus-sur-leau-du-robinet/cycle-de-leau/>
13. Ecoles des sciences de l'eau. Le cycle de l'eau - Le cycle de l'eau, français | Service géologique des États-Unis [Internet]. [cité 9 déc 2021]. Disponible sur: [https://www.usgs.gov/special-topics/water-science-school/science/le-cycle-de-leau-water-cycle-french?qt-science\\_center\\_objects=0#qt-science\\_center\\_objects](https://www.usgs.gov/special-topics/water-science-school/science/le-cycle-de-leau-water-cycle-french?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects)
14. La rédaction de Futura. Pourquoi le niveau de la mer et des océans monte ? [Internet]. [cité 6 déc 2021]. Disponible sur: <https://www.futura-sciences.com/planete/questions-reponses/mer-niveau-mer-oceans-monte-945/>
15. René M. La circulation atmosphérique : son organisation [Internet]. Encyclopédie de

- l'environnement. 2016 [cité 29 août 2022]. Disponible sur: <https://www.encyclopedie-environnement.org/air/la-circulation-atmospherique/>
16. La circulation atmosphérique globale [Internet]. 2020 [cité 29 août 2022]. Disponible sur: <https://www.youtube.com/watch?v=SmANt8gAI7c>
17. Altendorf D. Comprendre la force de Coriolis et son rôle dans la dynamique de l'atmosphère et de l'océan [Internet]. Sciencepost. 2020 [cité 29 août 2022]. Disponible sur: <https://sciencepost.fr/comprendre-la-force-de-coriolis-et-son-role-dans-la-dynamique-de-latmosphere-et-de-locean/>
18. Surfrider Ocean Campus. Les courants marins grands régulateurs du climat [Internet]. Surfrider Ocean Campus. [cité 9 déc 2021]. Disponible sur: <https://fr.oceancampus.eu/cours/1rn/les-courants-marins-grands-regulateurs-du-climat>
19. Terracol M. Continent de plastique : qu'est-ce que le vortex de déchets du Pacifique nord ? [Internet]. Geo.fr. 2022 [cité 28 août 2022]. Disponible sur: <https://www.geo.fr/environnement/definition-vortex-ou-tourbillon-de-dechets-du-pacifique-nord-great-pacific-garbage-patch-124624>
20. Pichat S, Thomas P, Minster JF. Les courants thermohalins et les eaux océaniques profondes — Planet-Terre [Internet]. [cité 9 déc 2021]. Disponible sur: <https://planet-terre.ens-lyon.fr/ressource/thermohalin-antarctique.xml>
21. The nature conservancy. El Nino Oscillation Australe | Résilience des récifs [Internet]. [cité 11 déc 2021]. Disponible sur: <https://reefresilience.org/fr/stressors/climate-and-ocean-change/el-nino-southern-oscillation/>
22. El Nino et l'oscillation australe (ENSO) [Internet]. 2021 [cité 11 déc 2021]. Disponible sur: <https://www.youtube.com/watch?v=MLAVDHDhEC4>
23. What is the North Atlantic Oscillation (NAO)? [Internet]. 2018 [cité 3 janv 2022]. Disponible sur: <https://www.youtube.com/watch?v=KOYJG7j4ly8>
24. Ortega P, Lehner F, Swingedouw D, Masson-Delmotte V, Raible CC, Casado M, et al. A model-tested North Atlantic Oscillation reconstruction for the past millennium. *Nature*. juill 2015;523(7558):71-4.
25. Lashermes B, M'Baye AB. Le NAO (North Atlantic Oscillation), véritable chef d'orchestre du climat européen.
26. Masson-Delmotte V, Zhai P, Pirani A, Connors SL, Péan C, Berger S, et al., éditeurs. Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. 2021.
27. Mondon S, Imbard M. Découvrir les nouveaux scénarios RCP et SSP utilisés par le GIEC [Internet]. Ministère de l'environnement, du développement durable et de l'énergie; 2013 [cité 3 janv 2021]. Disponible sur: <http://temis.documentation.developpement-durable.gouv.fr/document.html?id=Temis-0079718>
28. Ministère de la transition écologique. Observations du changement climatique [Internet]. Chiffres clés du climat. [cité 29 août 2022]. Disponible sur: <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/chiffres-cles-du-climat/1-observations-du-changement-climatique.php>
29. Météo France. Les 7 dernières années sont les plus chaudes à l'échelle du globe | Météo-France [Internet]. [cité 29 août 2022]. Disponible sur: <https://meteofrance.com/actualites-et-dossiers/actualites/planete/2021-5e-annee-la-plus-chaude-lechelle-du-globe-selon-copernicus>
30. Tuddenham M. Synthèse du Résumé à l'intention des décideurs du Giec. 2021;32.
31. Organisation météorologique mondiale. État du climat en 2021: des phénomènes météorologiques extrêmes et de lourdes conséquences [Internet]. 2021 [cité 3 janv 2021]. Disponible sur: <https://public.wmo.int/fr/medias/communiqu%C3%A9s-de->

presse/%C3%A9tat-du-climat-en-2021-des-ph%C3%A9nom%C3%A8nes-m%C3%A9t%C3%A9orologiques-extr%C3%A9mes-et-de

32. La rédaction de Futura. L'air : quelle est sa composition ? [Internet]. Futura. [cité 1 mars 2022]. Disponible sur: <https://www.futura-sciences.com/planete/questions-reponses/environnement-air-composition-57/>

33. Jancovici JM. Qu'est-ce que l'effet de serre ? [Internet]. [cité 1 mars 2022]. Disponible sur: <https://jancovici.com/changement-climatique/aspects-physiques/quest-ce-que-leffet-de-serre/>

34. CNRS. Effet de serre [Internet]. [cité 29 août 2022]. Disponible sur: <https://www.cnrs.fr/cw/dossiers/dosclim1/sysfacte/systfactMot/effetserre.htm>

35. Mélières MA. Echanges radiatifs entre le soleil, la Terre et l'Espace [Internet]. Bilan Radiatif de la Terre. [cité 1 mars 2022]. Disponible sur: [http://ressources.fondation-uved.fr/modules/moduleChangementsGlobaux/html/2-systeme-atmo\\_1-bilan-radiatif\\_5-ss-partie\\_1.html#6-ss-partie](http://ressources.fondation-uved.fr/modules/moduleChangementsGlobaux/html/2-systeme-atmo_1-bilan-radiatif_5-ss-partie_1.html#6-ss-partie)

36. La rédaction de Futura. Définition: Forçage radiatif, forçage radiatif positif, forçage radiatif négatif [Internet]. Futura. [cité 29 août 2022]. Disponible sur: <https://www.futura-sciences.com/planete/definitions/climatologie-forcage-radiatif-10242/>

37. L'Institut national de la statistique et des études économiques. Pouvoir de réchauffement global (PRG) [Internet]. [cité 1 mars 2022]. Disponible sur: <https://www.insee.fr/fr/metadonnees/definition/c1581>

38. Ministère de la transition écologique. Causes du changement climatique [Internet]. Chiffres clés du climat. [cité 29 août 2022]. Disponible sur: <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/chiffres-cles-du-climat/2-causes-du-changement-climatique.php>

39. Bréon FM. La vapeur d'eau est-elle bien prise en compte dans le calcul de l'effet de serre ? [Internet]. Le climat en questions. 2014 [cité 1 mars 2022]. Disponible sur: <https://www.climat-en-questions.fr/reponse/mecanismes-devolution/vapeur-deau-effet-serre-par-francois-marie-breon>

40. Ministère de la transition écologique. Panorama mondial des émissions de GES [Internet]. Chiffres clés du climat. [cité 29 août 2022]. Disponible sur: <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/chiffres-cles-du-climat/4-panorama-mondial-des-emissions-de-ges.php>

41. Organisation Météorologique mondiale, Global Atmosphère Watch. Bulletin de l'OMM sur les gaz à effet de serre.

42. Ministère de l'Environnement. Les halocarbures [Internet]. [cité 29 août 2022]. Disponible sur: <https://www.environnement.gouv.qc.ca/air/halocarbures/index.htm>

43. Boucher O. L'influence climatique des aérosols. 2022.

44. Sicre MA, Khodri M, Mignot J, et al. Effet des éruptions volcaniques sur le climat. In: Le climat à découvert [Internet]. CNRS Éditions; 2017 [cité 29 août 2022]. p. 201-3. Disponible sur: <http://books.openedition.org/editionscnrs/11468>

45. Futura. Albédo : qu'est-ce que c'est ? [cité 1 mars 2022]; Disponible sur: <https://www.futura-sciences.com/planete/definitions/climatologie-albedo-1023/>

46. Bard E, Delaygues G, Thomas P. Activité solaire et climat du passé [Internet]. [cité 1 mars 2022]. Disponible sur: <https://planet-terre.ens-lyon.fr/ressource/soleil-climat.xml>

47. Bard É. Influence du soleil sur le climat. Lett Collège Fr. 1 juin 2011;(31):32-5.

48. JL. Rapport AR6 du GIEC : Le point sur la température globale [Internet]. global climat. 2021 [cité 29 août 2022]. Disponible sur: <https://global-climat.com/2021/09/02/rapport-ar6-du-giec-le-point-sur-la-temperature-globale/>

49. Données Climatiques Canada. Comprendre les trajectoires communes d'évolution

socio-économique (SSP) [Internet]. [cité 13 déc 2022]. Disponible sur: <https://donneesclimatiques.ca/ressource/comprendre-les-trajectories-communes-devolution-socioeconomique-ssp/>

50. Réchauffement climatique : 5 cartes pour visualiser ce qui nous attend [Internet]. Les Echos Planète. 2022 [cité 29 août 2022]. Disponible sur: <https://planete.lesechos.fr/enquetes/rechauffement-climatique-5-cartes-pour-visualiser-ce-qui-nous-attend-13038/>

51. Balestrini A. Rapport AR6 du GIEC « résumé pour les décideurs » [Internet]. État d'urgence. 2021 [cité 29 août 2022]. Disponible sur: <https://etatdurgence.ch/blog/articles/rapport-ar6-du-giec-resume-pour-les-decideurs/>

52. Ministère de la transition écologique. Scénarios et projections climatiques [Internet]. Chiffres clés du climat. [cité 3 janv 2021]. Disponible sur: <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/chiffres-cles-du-climat/3-scenarios-et-projections-climatiques.php>

53. Blind Kempinski F, Février T. Réchauffement climatique : 5 cartes pour visualiser ce qui nous attend [Internet]. Les Echos Planète. 2022 [cité 30 août 2022]. Disponible sur: <https://planete.lesechos.fr/enquetes/rechauffement-climatique-5-cartes-pour-visualiser-ce-qui-nous-attend-13038/>

54. Huet S. Le rapport du GIEC en 18 graphiques [Internet]. Le Monde. [cité 1 mars 2022]. Disponible sur: <https://www.lemonde.fr/blog/huet/2021/08/09/le-rapport-du-giec-en-18-graphiques/>

55. Météo-Contact. La France et son climat [Internet]. Météo-Contact. [cité 14 mars 2022]. Disponible sur: <https://www.meteocontact.fr/climatologie/france/la-france-et-son-climat>

56. Météo France. 2020 : l'année la plus chaude en France depuis 1900 [Internet]. [cité 13 mars 2022]. Disponible sur: <https://meteofrance.com/actualites-et-dossiers-0/2020-lannee-la-plus-chaude-en-france-depuis-1900>

57. Tellez-Arenas A, Quique R, Boulahya F, Le Cozannet G, Paris F, Le Roy S, et al. Scalable interactive platform for geographic evaluation of sea-level Rise impact combining high-performance computing and WebGIS client [Internet]. 2018 [cité 14 mars 2022]. Disponible sur: [http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-74669-2\\_12](http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-74669-2_12)

58. Leussier H. Montée des eaux en France : les prévisions alarmantes des scientifiques [Internet]. Reporterre, le quotidien de l'écologie. [cité 14 mars 2022]. Disponible sur: <https://reporterre.net/Montee-des-eaux-en-France-les-previsions-alarmantes-des-scientifiques>

59. GéoLittoral. Indicateur national de l'érosion côtière [Internet]. 2016 [cité 14 mars 2022]. Disponible sur: <https://www.geolittoral.developpement-durable.gouv.fr/indicateur-national-de-l-erosion-cotiere-r473.html>

60. Cerema. Le Cerema achève la réalisation de l'indicateur national de l'érosion côtière [Internet]. Cerema. [cité 30 août 2022]. Disponible sur: <http://www.cerema.fr/fr/actualites/cerema-acheve-realisation-indicateur-national-erosion>

61. Ministères Énergie Énergie Territoires. Impacts du changement climatique : Montagne et Glaciers [Internet]. Ministères Énergie Énergie Territoires. [cité 5 mai 2022]. Disponible sur: <https://www.ecologie.gouv.fr/impacts-du-changement-climatique-montagne-et-glaciers>

62. Météo France. Vagues de chaleur et changement climatique [Internet]. Météo France. [cité 30 août 2022]. Disponible sur: <https://meteofrance.com/changement-climatique/observer/changement-climatique-et-vagues-de-chaleur>

63. Bourcier V, Carrega M, Corona C, et al. Les événements météorologiques extrêmes dans un contexte de changement climatique: rapport au Premier ministre et au Parlement.

Paris: La documentation française; 2019.

64. Météo France. Tempêtes et changement climatique - Tempêtes en France métropolitaine [Internet]. Météo France. [cité 30 août 2022]. Disponible sur: <http://tempetes.meteo.fr/spip.php?article197>
65. Julien C. Événements météorologiques extrêmes et changement climatique [Internet]. Encyclopédie de l'environnement. 2018 [cité 30 août 2022]. Disponible sur: <https://www.encyclopedie-environnement.org/climat/evenements-meteorologiques-extremes-changement-climatique/>
66. arthropodes [Internet]. [cité 29 mars 2021]. Disponible sur: <https://www.afblum.be/bioafb/arthropo/arthropo.htm>
67. Les Insectes [Internet]. [cité 29 mars 2021]. Disponible sur: <https://www.afblum.be/bioafb/insectes/insectes.htm>
68. Muséum national d'Histoire naturelle. Le « graal » de l'entomologie enfin découvert : le plus ancien insecte fossile complet du monde [Internet]. Muséum national d'Histoire naturelle. [cité 2 janv 2023]. Disponible sur: <https://www.mnhn.fr/fr/communique-de-presse/le-graal-de-l-entomologie-enfin-decouvert-le-plus-ancien-insecte-fossile>
69. Gilles B. La métamorphose chez les insectes [Internet]. 2014 [cité 2 janv 2023]. Disponible sur: <https://passion-entomologie.fr/metamorphose-chez-les-insectes/>
70. Darriet F. L'histoire naturelle des moustiques et des hommes. In: Des moustiques et des hommes : Chronique d'une pullulation annoncée [Internet]. Marseille: IRD Éditions; 2017 [cité 8 sept 2021]. p. 11-43. (Didactiques). Disponible sur: <http://books.openedition.org/irdeditions/9282>
71. E. Greenwalt D, S. Goreva Y, M. Siljeström S. Porphyrines dérivées de l'hémoglobine conservées dans un moustique gorgé de sang de l'Éocène moyen | PNAS [Internet]. [cité 8 sept 2021]. Disponible sur: <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.1310885110>
72. Bagny L. Caractérisation de l'invasion d'*Aedes albopictus* en présence d'*Aedes aegypti* à la Réunion et à Mayotte. 213apr. J.-C.
73. Merabti B. Identification, composition et structure des populations Culicidiénne de la région de Biskra (Sud-est Algérien). Effets des facteurs écologiques sur l'abondance saisonnière. Essais de lutte [Internet]. 2016. Disponible sur: <https://dspace.univ-ouargla.dz/jspui/bitstream/123456789/13787/3/Merabti-Brahim.pdf>
74. Carnevale P, Robert V, éditeurs. 2. Morphologie. In: Les anophèles : Biologie, transmission du Plasmodium et lutte antivectorielle [Internet]. Marseille: IRD Éditions; 2017 [cité 21 sept 2020]. p. 22-46. (Didactiques). Disponible sur: <http://books.openedition.org/irdeditions/10388>
75. Brasseur A. Analyse des pratiques actuelles destinées à limiter la propagation d'*Aedes Albopictus* dans la zone sud est de la france et propositions d'amélioration. :72.
76. Villarreal MR. *Culex pipiens* diagram [Internet]. Disponible sur: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Culex\\_pipiens\\_diagram\\_fr.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Culex_pipiens_diagram_fr.svg)
77. Guèye Fall A. Techniques de capture et d'identification des moustiques (Diptera : Culicidae) vecteurs de la fièvre de la vallée du Rift.
78. 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.
79. Bohbot JD, Sparks JT, Dickens JC. The maxillary palp of *Aedes aegypti*, a model of multisensory integration. *Insect Biochem Mol Biol*. 1 mai 2014;48:29-39.
80. Vacus G. Expansion géographique d'*Aedes albopictus*: Quel risque de maladies émergentes en France métropolitaine? [Internet]. 2012. Disponible sur: [www.inma.fr/wp-content/uploads/2017/08/dip\\_mem\\_2012\\_26\\_vacus.pdf](http://www.inma.fr/wp-content/uploads/2017/08/dip_mem_2012_26_vacus.pdf)
81. Quiros G. How Mosquitoes Use Six Needles to Suck Your Blood [Internet]. KQED. [cité

- 30 août 2022]. Disponible sur: <https://www.kqed.org/science/728086/how-mosquitoes-use-six-needles-to-suck-your-blood>
82. How Mosquitoes Use Six Needles to Suck Your Blood | Deep Look [Internet]. 2016. Disponible sur: <https://www.youtube.com/watch?v=rD8SmacBUcU>
83. Biogents. Le moustique tigre (Aedes albopictus) [Internet]. Biogents AG. [cité 30 août 2022]. Disponible sur: <https://eu.biogents.com/aedes-albopictus-moustique-tigre/?lang=fr>
84. Peach DAH. La vie étrange, secrète – et très écolos – des moustiques dévoilée [Internet]. The Conversation. [cité 30 août 2022]. Disponible sur: <http://theconversation.com/la-vie-étrange-secrète-et-tres-écolos-des-moustiques-devoilee-128451>
85. Hartkopf-Fröder C, Rust J, Wappler T, Friis EM, Viehofen A. Mid-Cretaceous charred fossil flowers reveal direct observation of arthropod feeding strategies. Biol Lett. 23 avr 2012;8(2):295-8.
86. Rozell N. Seventeen trillion wingbeats over Alaska [Internet]. University of Alaska fairbanks. 2015. Disponible sur: <https://uaf.edu/news/archives/news-archives-2010-2021/seventeen-trillion-wingbeats-alaska.php#:~:text=Alaska%20is%20home%20to%20about,in%20his%20answer%20to%20En gelhard>
87. Ndiath O. Etude de la compétence et de la capacité vectorielle des vecteurs du paludisme à Madagascar [Internet]. Institut Pasteur de Madagascar. [cité 30 août 2022]. Disponible sur: <https://www.pasteur.mg/projets/etude-de-la-competence-et-de-la-capacite-vectorielle-des-vecteurs-du-paludisme-a-madagascar/>
88. Institut Pasteur de Madagascar. Compétence et capacité vectorielle [Internet]. 09:05:12 UTC [cité 30 août 2022]. Disponible sur: <https://fr.slideshare.net/atelier-paludisme/pres-s4-07mbanyehypax>
89. Académie nationale de médecine. Dictionnaire médical de l'Académie de Médecine [Internet]. [cité 30 août 2022]. Disponible sur: <https://www.academie-medecine.fr/le-dictionnaire/index.php?q=transmission%20vectorielle>
90. Institut Pasteur de Madagascar. Capacité vectorielle et compétence vectorielle des anophèles [Internet]. 04:57:01 UTC [cité 30 août 2022]. Disponible sur: <https://fr.slideshare.net/atelier-paludisme/app-08-s4idrissa>
91. Institut national de santé publique du Québec. Arthropodes: Situation et définition [Internet]. Disponible sur: <https://www.inspq.qc.ca/sante-voyage/guide/risques/arthropodes/situation>
92. Golding N, Wilson A, Moyes C, Cano J, Pigott D, Velayudhan R, et al. Integrating vector control across diseases. BMC Med. 1 oct 2015;13:249.
93. Alonso P, Engels D, Reefer J. Nouveaux efforts pour renforcer la lutte antivectorielle dans le monde [Internet]. Disponible sur: <https://www.who.int/fr/news-room/commentaries/detail/renewed-push-to-strengthen-vector-control-globally>
94. Salinas S, Foulongne V, Loustalot F, Fournier-Wirth C, Molès JP, Briant L, et al. Le virus Zika - L'émergence d'une menace. médecine/sciences. 1 avr 2016;32(4):378-86.
95. Lefeuvre C, Apaire-Marchais V. Dengue, chikungunya et Zika, des arboviroses émergentes en France métropolitaine. Actual Pharm. juill 2021;60(608):21-7.
96. Failloux AB. Les moustiques vecteurs d'arbovirus : une histoire sans fin. Biol Aujourd'hui. 2018;212(3-4):89-99.
97. Fontenille D, Lagnau C, Lecollinet S, Lefait Robin R, Setbon M, Tirel B, et al., éditeurs. De l'évaluation des risques vectoriels à l'évaluation du risque épidémique. In: La lutte antivectorielle en France [Internet]. IRD Éditions; 2013 [cité 31 août 2022]. p. 163-80. (Expertise collégiale). Disponible sur: <http://books.openedition.org/irdeditions/1236>

98. OMS. Dengue et dengue sévère [Internet]. [cité 31 août 2022]. Disponible sur: <https://www.who.int/fr/news-room/fact-sheets/detail/dengue-and-severe-dengue>
99. Santé publique France. Dengue [Internet]. Santé publique France. [cité 31 août 2022]. Disponible sur: <https://www.santepubliquefrance.fr/maladies-et-traumatismes/maladies-a-transmission-vectorielle/dengue>
100. OMS. Global strategy for dengue prevention and control 2012-2020 [Internet]. Geneva: World Health Organization; 2012 [cité 31 août 2022]. Disponible sur: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/75303>
101. Harapan H, Michie A, Sasmono RT, Imrie A. Dengue: A Minireview. *Viruses*. 30 juill 2020;12(8):829.
102. Inserm. Dengue [Internet]. Inserm. [cité 31 août 2022]. Disponible sur: <https://www.inserm.fr/dossier/dengue/>
103. Institut Pasteur. Dengue : informations et traitements [Internet]. [cité 31 août 2022]. Disponible sur: <https://www.pasteur.fr/fr/centre-medical/fiches-maladies/dengue>
104. Stanaway JD, Shepard DS, Undurraga EA, Halasa YA, Coffeng LE, Brady OJ, et al. The Global Burden of Dengue: an analysis from the Global Burden of Disease Study 2013. *Lancet Infect Dis*. juin 2016;16(6):712-23.
105. Mon carnet de vaccination électronique, pour être mieux vacciné, sans défaut ni excès [Internet]. Mon carnet de vaccination électronique, pour être mieux vacciné, sans défaut ni excès. Disponible sur: <http://www.mesvaccins.net/web/vaccines/539-dengvaxia>
106. HAS. DENGVAXIA (vaccin contre la dengue quadrivalent (vivant, atténué)) [Internet]. Haute Autorité de Santé. Disponible sur: [https://www.has-sante.fr/jcms/p\\_3302593/fr/dengvaxia-vaccin-contre-la-dengue-quadrivalent-vivant-attenu](https://www.has-sante.fr/jcms/p_3302593/fr/dengvaxia-vaccin-contre-la-dengue-quadrivalent-vivant-attenu)
107. Franceinfo. Vaccin contre la dengue : les Philippines poursuivent en justice six responsables de Sanofi [Internet]. [cité 31 août 2022]. Disponible sur: [https://www.francetvinfo.fr/sante/maladie/vaccin-contre-la-dengue-les-philippines-poursuivent-en-justice-six-responsables-de-sanofi\\_3213199.html](https://www.francetvinfo.fr/sante/maladie/vaccin-contre-la-dengue-les-philippines-poursuivent-en-justice-six-responsables-de-sanofi_3213199.html)
108. Ganesan VK, Duan B, Reid SP. Chikungunya virus: Pathophysiology, mechanism, and modeling. *Viruses*. 1 déc 2017;9(12):368.
109. OMS. Chikungunya [Internet]. [cité 1 sept 2022]. Disponible sur: <https://www.who.int/fr/news-room/fact-sheets/detail/chikungunya>
110. Mohan A, Kiran D, Manohar IC, Kumar DP. Epidemiology, clinical manifestations, and diagnosis of chikungunya fever; Lessons learned from the re-emerging epidemic. *Indian J Dermatol*. 2010;55(1):54-63.
111. OMS. Chikungunya [Internet]. World Health Organization; [cité 1 sept 2022]. Disponible sur: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs327/fr/>
112. ARS PACA. Surveillance épidémiologique de la dengue, du chikungunya et du zika [Internet]. [cité 1 sept 2022]. Disponible sur: <https://www.paca.ars.sante.fr/surveillance-epidemiologique-de-la-dengue-du-chikungunya-et-du-zika>
113. Gérardin P, Fianu A, Malvy D, Mussard C, Boussaïd K, Rollot O, et al. Perceived morbidity and community burden after a Chikungunya outbreak: the TELECHIK survey, a population-based cohort study. *BMC Med*. 14 janv 2011;9:5.
114. Martínez-Pulgarín DF, Chowdhury FR, Villamil-Gomez WE, Rodriguez-Morales AJ, Blohm GM, Paniz-Mondolfi AE. Ophthalmologic aspects of chikungunya infection. *Travel Med Infect Dis*. 1 sept 2016;14(5):451-7.
115. Alvarez MF, Bolívar-Mejía A, Rodriguez-Morales AJ, Ramirez-Vallejo E. Cardiovascular involvement and manifestations of systemic Chikungunya virus infection: A systematic review. *F1000Research*. 2017;6:390.
116. Chandak NH, Kashyap RS, Kabra D, Karandikar P, Saha SS, Morey SH, et al. Neurological

- complications of Chikungunya virus infection. Neurol India. avr 2009;57(2):177-80.
117. Santé publique France. Chikungunya [Internet]. [cité 1 sept 2022]. Disponible sur: <https://www.santepubliquefrance.fr/maladies-et-traumatismes/maladies-a-transmission-vectorielle/chikungunya>
118. Song BH, Yun SI, Woolley M, Lee YM. Zika virus: History, epidemiology, transmission, and clinical presentation. J Neuroimmunol. 15 juill 2017;308:50-64.
119. OMS. Zika (maladie à virus) [Internet]. Disponible sur: <https://www.who.int/fr/news-room/fact-sheets/detail/zika-virus>
120. David DJ. Détection par RT-PCR du virus Zika dans le sang et les urines. 2016;33.
121. Fontanet A. Zika : confirmation d'un lien de causalité entre le virus Zika et les syndromes de Guillain-Barré [Internet]. Institut Pasteur. 2016. Disponible sur: <https://www.pasteur.fr/fr/zika-confirmation-lien-causalite-entre-virus-zika-syndromes-guillain-barre>
122. Schuler-Faccini L. Possible Association Between Zika Virus Infection and Microcephaly - Brazil, 2015. MMWR Morb Mortal Wkly Rep [Internet]. 2016 [cité 2 sept 2022];65. Disponible sur: <https://www.cdc.gov/mmwr/volumes/65/wr/mm6503e2.htm>
123. Bujan L. ZIKA virus, voies génitales et transmission sexuelle. Académie Médecine [Internet]. [cité 2 sept 2022]; Disponible sur: <https://www.academie-medecine.fr/zika-virus-voies-genitales-et-transmission-sexuelle/>
124. Fontenille D, Lagneau C, Lecollinet S, et al. La lutte antivectorielle en France. Marseille: IRD; 2009. (Collection Expertise collégiale).
125. Mouro E. Biodiversité et moustiques face au changement climatique et à la mondialisation. Impacts sur la santé en France métropolitaine.
126. Katz TM, Miller JH, Hebert AA. Insect repellents: Historical perspectives and new developments. J Am Acad Dermatol. 1 mai 2008;58(5):865-71.
127. Blanchon T, Bley D, Re C, Boher E, Gourlay-France C, Hoen B, et al. Recommandations sanitaires pour les voyageurs, 2020 (à l'attention des professionnels de santé). 2020;91.
128. Tri-national initiative group of entomology in upper Rhine valley. Gîtes larvaires [Internet]. TIGER. [cité 5 sept 2022]. Disponible sur: <https://tiger-platform.eu/fr/moustique-tigre/gites-larvaires/>
129. Dehecq JS, Eritja R, Etienne M, Foussadier R, et al. Guide à l'attention des collectivités souhaitant mettre en oeuvre une lutte contre les moustiques urbains vecteurs de dengue, de chikungunya et de zika.
130. ANSES. La lutte anti-vectorielle, des stratégies multiples contre les vecteurs [Internet]. Anses - Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail. 2018 [cité 5 sept 2022]. Disponible sur: <https://www.anses.fr/fr/content/la-lutte-anti-vectorielle-des-strat%C3%A9gies-multiples-contre-les-vecteurs>
131. Arzul G, Badot PM, Berjeaud JM, et al. Hiérarchisation des insecticides potentiellement utilisables en lutte anti-vectorielle (LAV). 2013 janv p. 66. Report No.: 2012-SA-0028.
132. NatGeoFrance. Les chiroptéroducts : les meilleurs alliés des chauves-souris aux abords des routes [Internet]. National Geographic. 2018 [cité 5 sept 2022]. Disponible sur: <https://www.nationalgeographic.fr/photography/2018/07/les-chiropteroducts-les-meilleurs-allies-des-chauves-souris-aux-abords-des-routes>
133. Bécherel S. Les moustiques transgéniques sont-ils vraiment l'arme infaillible contre la dengue ? [Internet]. France Inter. 2019 [cité 5 sept 2022]. Disponible sur: <https://www.radiofrance.fr/franceinter/les-moustiques-transgeniques-sont-ils-vraiment-larme-infaillible-contre-la-dengue-6525601>
134. Institut Pasteur. Wolbachia, une bactérie pour lutter contre la dengue [Internet]. Institut Pasteur. 2019 [cité 5 sept 2022]. Disponible sur: <https://www.pasteur.fr/fr/institut->

- pasteur/institut-pasteur-monde/actualites/wolbachia-bacterie-lutter-contre-dengue
135. World Mosquito Program. Wolbachia mosquitoes block dengue across Australia's far north [Internet]. World Mosquito Program. [cité 5 sept 2022]. Disponible sur: <https://www.worldmosquitoprogram.org/en/news-stories/media-releases/wolbachia-mosquitoes-block-dengue-across-australias-far-north>
136. Conseil national de l'ordre des pharmaciens. Cespharm - Quels concepts ? [Internet]. [cité 5 sept 2022]. Disponible sur: <https://www.cespharm.fr/prevention-sante/L-education-pour-la-sante/quels-concepts>
137. Maïlys B. Nouvelles stratégies de lutte contre les moustiques vecteurs de maladies et leur translation dans le domaine technique et social. :90.
138. Santé publique France. Liste des maladies à déclaration obligatoire [Internet]. [cité 5 sept 2022]. Disponible sur: <https://www.santepubliquefrance.fr/maladies-a-declaration-obligatoire/liste-des-maladies-a-declaration-obligatoire>
139. Santé publique France. Liste des maladies à déclaration obligatoire [Internet]. [cité 13 sept 2022]. Disponible sur: <https://www.santepubliquefrance.fr/maladies-a-declaration-obligatoire/liste-des-maladies-a-declaration-obligatoire>
140. ARS Île-de-France. Du 1er mai au 30 novembre : surveillance renforcée du moustique tigre [Internet]. 2022 [cité 28 janv 2023]. Disponible sur: <https://www.iledefrance.ars.sante.fr/du-1er-mai-au-30-novembre-surveillance-renforcee-du-moustique-tigre>
141. Mouchet J, Giacomini T, Julvez J. La diffusion anthropique des arthropodes vecteurs de maladie dans le monde. :7.
142. Kraemer MUG, Sinka ME, Duda KA, Mylne A, Shearer FM, Brady OJ, et al. The global compendium of *Aedes aegypti* and *Ae. albopictus* occurrence. *Sci Data*. 7 juill 2015;2:150035.
143. Scholte EJ, Schaffner F. Waiting for the tiger: Establishment and spread of the *Aedes albopictus* mosquito in Europe. In 2007. p. 241-60.
144. Rodhain F. Les insectes ne connaissent pas nos frontières. *Médecine Mal Infect*. 1 avr 1996;26:408-14.
145. De Muelenaere. Le moustique-tigre, adepte de l'auto-stop sur les autoroutes belges [Internet]. Le Soir. 2019 [cité 27 oct 2022]. Disponible sur: <https://www.lesoir.be/263208/article/2019-11-28/le-moustique-tigre-adepte-de-lauto-stop-sur-les-autoroutes-belges>
146. Cartes de présence du moustique tigre (*Aedes albopictus*) en France métropolitaine - Ministère de la Santé et de la Prévention [Internet]. [cité 25 août 2022]. 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>
147. Gemenne F, Denis M. Qu'est-ce que l'Anthropocène ? [Internet]. [cité 17 oct 2022]. Disponible sur: <https://www.vie-publique.fr/parole-dexpert/271086-terre-climat-quest-ce-que-lanthropocene-ere-geologique>
148. Talaga S. Ecologie, diversité et évolution des moustiques (Diptera Culicidae) de Guyane française : implications dans l'invasion biologique du moustique *Aedes aegypti* (L.). 2016.
149. McKinney ML. Effects of urbanization on species richness: A review of plants and animals. *Urban Ecosyst*. 1 juin 2008;11(2):161-76.
150. Talaga S, Delabie JHC, Dézerald O, Salas-Lopez A, Petitclerc F, Leroy C, et al. A bromeliad species reveals invasive ant presence in urban areas of French Guiana. *Ecol Indic* [Internet]. 2015 [cité 17 oct 2022]; Disponible sur: <https://agritrop.cirad.fr/579163/>
151. Blair RB. Birds and Butterflies Along Urban Gradients in Two Ecoregions of the United States: Is Urbanization Creating a Homogeneous Fauna? In: Lockwood JL, McKinney ML,

- éditeurs. Biotic Homogenization [Internet]. Boston, MA: Springer US; 2001 [cité 17 oct 2022]. p. 33-56. Disponible sur: [https://doi.org/10.1007/978-1-4615-1261-5\\_3](https://doi.org/10.1007/978-1-4615-1261-5_3)
152. Vallet J. Gradient d'urbanisation et communautés végétales d'espaces boisés. Approche à plusieurs échelles dans trois agglomérations du Massif armoricain [Internet]. Université d'Angers; 2009 [cité 17 oct 2022]. Disponible sur: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00409694>
153. Hounkpe J, Ecole des hautes études en santé publique (EHESP). Gîtes larvaires d'Aedes albopictus dans le bâti et les ouvrages de gestion des eaux pluviales : état des lieux et enjeux en termes de stratégie de contrôle. 2012. réf. 4p.
154. EID méditerranée. Surveillance [Internet]. EID. [cité 25 oct 2022]. Disponible sur: <https://www.eid-med.org/surveillance/>
155. EID Rhône-Alpes. Formation du 26 nov 2018 [Internet]. [cité 12 déc 2022]. Disponible sur: <https://www.eid-rhonealpes.com/lorem-ipsum/99-formation-26-nov-2018>
156. Pourquoi fait-il plus chaud en ville qu'à la campagne la nuit ? | Météo-France [Internet]. [cité 22 oct 2022]. Disponible sur: <https://meteofrance.com/actualites-et-dossiers/magazine/pourquoi-fait-il-plus-chaud-en-ville-qua-la-campagne-la-nuit>
157. Météo France. L'hiver [Internet]. [cité 24 oct 2022]. Disponible sur: <https://meteofrance.com/comprendre-la-meteo/saisons/hiver>
158. Stéphanie S. Pourquoi le moustique tigre est-il aussi invasif ? [Internet]. Encyclopédie de l'environnement. 2020 [cité 24 oct 2022]. Disponible sur: <https://www.encyclopedie-environnement.org/vivant/pourquoi-moustique-tigre-invasif/>
159. Shea K, Chesson P. Community ecology theory as a framework for biological invasions. Trends Ecol Evol. 1 avr 2002;17(4):170-6.
160. Beisel JN, Lévêque C. Introduction d'espèces dans les milieux aquatiques: Faut-il avoir peur des invasions biologiques ? Editions Quae; 2010. 242 p.
161. Savard JPL, Clergeau P, Mennechez G. Biodiversity concepts and urban ecosystems. Landsc Urban Plan. 1 mai 2000;48(3):131-42.
162. Le rôle de la chauve-souris dans la lutte anti-moustique [Internet]. Qista. [cité 31 oct 2022]. Disponible sur: <https://qista.com/fr/chauve-souris-lutte-anti-moustique>
163. Centre d'observation de la société. La part de la population vivant en ville plafonne depuis dix ans [Internet]. [cité 5 nov 2022]. Disponible sur: <https://www.observationsociete.fr/population/donneesgeneralespopulation/la-part-de-la-population-vivant-en-ville-plafonne/>
164. Agreste. L'occupation du sol entre 1982 et 2018 [Internet]. [cité 14 nov 2022]. Disponible sur: <https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/disaron/Dos2103/detail/>
165. INSEE. Unités urbaines – La France et ses territoires [Internet]. [cité 12 déc 2022]. Disponible sur: <https://www.insee.fr/fr/statistiques/5039853?sommaire=5040030>
166. Confalonieri UE, Menezes JA, de Souza CM. Climate change and adaptation of the health sector: The case of infectious diseases. Virulence. 15 juill 2015;6(6):554-7.
167. Altizer S, Ostfeld RS, Johnson PJ, Kutz S, Harvell C. Changement climatique et maladies infectieuses : des preuves à un cadre prédictif [Internet]. [cité 22 nov 2022]. Disponible sur: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov.buadistant.univ-angers.fr/23908230/>
168. Chen MJ, Lin CY, Wu PC, Shih-Chun P, Su HJ. Effets des précipitations extrêmes sur la distribution des maladies infectieuses à Taïwan [Internet]. [cité 19 nov 2022]. Disponible sur: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov.buadistant.univ-angers.fr/22737206/>
169. de Sherbinin A. The biophysical and geographical correlates of child malnutrition in Africa. Popul Space Place. 2011;17(1):27-46.
170. Paquet C. Changements climatiques et santé dans les pays en développement : quels sont les enjeux ? 2019;61(3):31-40.

171. Morin CW, Comrie AC, Ernst K. Climate and Dengue Transmission: Evidence and Implications. *Environ Health Perspect.* 2013;121(11-12):1264-72.
172. Lewis DJ. Observations on *Aedes aegypti*, L. (Dipt. Culic.) under controlled Atmospheric Conditions. *Bull Entomol Res.* sept 1933;24(3):363-72.
173. Rowley WA, Graham CL. The effect of temperature and relative humidity on the flight performance of female *Aedes aegypti*. *J Insect Physiol.* 1 sept 1968;14(9):1251-7.
174. Rickard C. *Aedes Aegypti* (L.), the Yellow Fever Mosquito. Its life history, bionomics, and structure [Internet]. Science. [cité 28 nov 2022]. Disponible sur: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.133.3463.1473.b>
175. Reinhold JM, Lazzari CR, Lahondère C. Effects of the Environmental Temperature on *Aedes aegypti* and *Aedes albopictus* Mosquitoes: A Review. *Insects.* déc 2018;9(4):158.
176. Delatte H, Gimonneau G, Triboire A, Fontenille D. Influence of temperature on immature development, survival, longevity, fecundity, and gonotrophic cycles of *Aedes albopictus*, vector of chikungunya and dengue in the Indian Ocean. *J Med Entomol.* janv 2009;46(1):33-41.
177. Hawley WA, Pumpuni CB, Brady RH, Craig GB. Overwintering survival of *Aedes albopictus* (Diptera: Culicidae) eggs in Indiana. *J Med Entomol.* mars 1989;26(2):122-9.
178. Gould EA, Higgs S. Impact of climate change and other factors on emerging arbovirus diseases. *Trans R Soc Trop Med Hyg.* 1 févr 2009;103(2):109-21.
179. Alto BW, Juliano SA. Precipitation and temperature effects on populations of *Aedes albopictus* (Diptera: Culicidae): Implications for range expansion. *J Med Entomol.* sept 2001;38(5):646-56.
180. Vanwambeke SO, Lambin EF, Eichhorn MP, Flasse SP, Harbach RE, Oskam L, et al. Impact of Land-use Change on Dengue and Malaria in Northern Thailand. *EcoHealth.* 1 mars 2007;4(1):37-51.
181. Pautou G, Bravard JP. L'incidence des activités humaines sur la dynamique de l'eau et l'évolution de la végétation dans la vallée du Haut-Rhône français. *Géocarrefour.* 1982;57(1):63-79.
182. Patz JA, Norris D. Land use change and human health. *Ecosyst Land Use Change* 2004. 1 janv 2004;159-67.
183. European Centre for Disease Prevention and Control. *Aedes albopictus* - current known distribution: March 2022 [Internet]. 2022 [cité 11 déc 2022]. Disponible sur: <https://www.ecdc.europa.eu/en/publications-data/aedes-albopictus-current-known-distribution-march-2022>
184. Proestos Y, Christophides GK, Ergüler K, et al. Present and future projections of habitat suitability of the Asian tiger mosquito, a vector of viral pathogens, from global climate simulation. *Philos Trans R Soc B Biol Sci.* 5 avr 2015;370(1665):20130554.
185. Instruction N° DGS/VSS1/2019/258 du 12 décembre 2019 relative à la prévention des arboviroses [Internet]. Légifrance. [cité 10 déc 2022]. Disponible sur: <https://www.legifrance.gouv.fr/download/pdf/circ?id=44904>
186. HCSP. Infection par le virus Zika : inscription sur la liste des maladies à déclaration obligatoire [Internet]. Rapport de l'HCSP. Paris: Haut Conseil de la Santé Publique; 2016 févr [cité 10 déc 2022]. Disponible sur: <https://www.hcsp.fr/explore.cgi/avisrapportsdomaine?clefr=539>
187. Cochet A, Calba C, Jourdain F, Grard G, Durand GA, Guinard A, et al. Autochthonous dengue in mainland France, 2022: geographical extension and incidence increase. 3 nov 2022;27(44):2200818.
188. Jourdain F, et al. Quels sont les facteurs d'émergence du chikungunya et de la dengue dans une zone tempérée ? [Internet]. [cité 10 déc 2022]. Disponible sur: <https://www.hcsp.fr/explore.cgi/avisrapportsdomaine?clefr=539>

<https://www.ird.fr/quels-sont-les-facteurs-demergence-du-chikungunya-et-de-la-dengue-dans-une-zone-temperee>

189. Bénie Bi Vroh J, Seck I. La mise en œuvre du concept One Health est-elle une réalité en Afrique ? Santé Publique. 2016;28(3):283-5.

190. Zinsstag J, Schelling E, Waltner-Toews D, A. Whittaker M, Tanner M. One Health, une seule santé [Internet]. éditions Quae; 2020 [cité 17 janv 2023]. Disponible sur: <https://www.quae-open.com/produit/151/9782759230976/one-health-une-seule-sante>

191. One Health [Internet]. Anses - Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail. 2020 [cité 17 janv 2023]. Disponible sur: <https://www.anses.fr/fr/content/one-health>

# Table des matières

Introduction .....	1
<b>PARTIE 1 : Les variations climatiques .....</b>	<b>2</b>
1.    Définition des climats.....	2
1.1.    Introduction générale .....	2
1.1.1.    Le climat polaire .....	3
1.1.2.    Le climat tempéré.....	4
a)    Le climat continental.....	4
b)    Le climat océanique .....	4
1.1.3.    Le climat méditerranéen .....	4
1.1.4.    Le climat chinois .....	5
1.1.5.    Le climat équatorial.....	5
1.1.6.    Le climat tropical .....	5
1.1.7.    La mousson.....	5
1.1.8.    Le climat montagnard.....	6
1.1.9.    Le climat aride .....	6
1.2.    Les facteurs déterminant le climat .....	7
1.2.1.    Le soleil.....	7
a)    Description .....	7
b)    Les variations de l'énergie solaire à la surface de la Terre.....	7
<u>Les variations spatiales</u> .....	7
<u>Les variations temporelles</u> .....	9
1.2.2.    L'eau .....	9
a)    Le cycle de l'eau .....	9
b)    Le niveau des océans.....	11
1.2.3.    La circulation atmosphérique : les vents .....	11
1.2.4.    La circulation océanique : Les courants marins.....	13
1.2.5.    Les phénomènes climatiques majeurs .....	15
a)    L'ENSO .....	15
b)    Oscillation nord-atlantique (NAO, North Atlantic Oscillation) .....	18
2.    Le réchauffement climatique .....	19
2.1.    Introduction .....	19
2.2.    Les éléments scientifiques .....	20
2.2.1.    La température .....	20
2.2.2.    Les précipitations.....	21
2.2.3.    Le niveau de la mer.....	21
2.2.4.    Les phénomènes extrêmes.....	22
2.2.5.    Fonte des glaces .....	22

2.3. Les causes du réchauffement climatique.....	24
2.3.1. Quelques rappels.....	24
<u>L'effet de serre</u> .....	24
<u>Le forçage radiatif</u> .....	25
2.3.2. Les émissions de gaz à effet de serre .....	26
<u>La vapeur d'eau</u> .....	26
<u>Le dioxyde de carbone</u> .....	27
<u>Le méthane</u> .....	28
<u>L'oxyde nitreux</u> .....	28
<u>Les hydrocarbures halogénés et composés apparentés</u> .....	28
<u>L'ozone</u> .....	29
<u>Gaz à effet de serre indirect</u> .....	29
2.3.3. Le rôle des aérosols .....	30
2.3.4. Le rôle de l'activité volcanique dans l'effet de serre .....	30
2.3.5. Les modifications de l'albédo .....	31
2.3.6. L'activité solaire.....	31
2.3.7. Conclusion .....	31
2.4. Les projections du GIEC.....	33
2.4.1. Les scénarios.....	33
a) Scénario SSP1 – 1.9 .....	33
b) Scénario SSP1 – 2.6 .....	34
c) Scénario SSP2 – 4.5 .....	34
d) Scénario SSP3 – 7.0 .....	34
e) Scénario SSP5 – 8.5 .....	34
2.4.2. Les changements attendus.....	35
a) Les Gaz à effet de serre .....	35
b) Les températures .....	35
c) Le niveau de la mer .....	37
d) La cryosphère .....	37
e) Les précipitations .....	37
f) Les phénomènes extrêmes .....	38
<b>3. France métropolitaine .....</b>	<b>40</b>
3.1. Climat .....	40
3.2. Les variations climatiques .....	41
3.2.1. L'évolution des températures .....	41
3.2.2. L'évolution future du niveau de la mer .....	41
3.2.3. L'évolution des glaciers métropolitains français .....	44
3.2.4. L'évolution des précipitations .....	45
3.2.5. Les phénomènes extrêmes.....	45

<b>PARTIE 2 : Le moustique tigre (<i>Aedes albopictus</i>), vecteur d'arboviroses .....</b>	<b>47</b>
<b>1. Le vecteur .....</b>	<b>47</b>
1.1. Position dans la classification phylogénétique.....	47
1.2. Caractéristiques physiques et biologiques <i>d'Aedes albopictus</i> .....	49
1.2.1. Description morphologique de l'œuf .....	49
1.2.2. Description morphologique de la larve .....	49
<u>La tête</u> .....	49
<u>Le thorax</u> .....	50
<u>L'abdomen</u> .....	50
1.2.3. Description morphologique de la nymphe .....	50
1.2.4. Description morphologique de l'adulte (de l'imago).....	51
<u>Tête</u> .....	52
<u>Thorax</u> .....	54
<u>Abdomen</u> .....	55
1.3. Cycle de développement.....	56
1.3.1. Stade de l'œuf .....	56
1.3.2. Stade de larve .....	57
1.3.3. Stade de nymphe.....	58
1.3.4. Stade adulte.....	58
1.4. Place dans la chaîne alimentaire.....	60
1.5. Compétence, capacité vectorielle et écologie du vecteur .....	61
1.5.1. Compétence vectorielle.....	61
1.5.2. Capacité vectorielle .....	61
<b>2. Les arboviroses transmises : Dengue, chikungunya et Zika.....</b>	<b>63</b>
2.1. Introduction : Les arboviroses.....	63
2.2. Transmission d'une arbovirose .....	65
2.2.1. Transmission vectorielle .....	65
2.2.2. Transmission verticale .....	67
2.2.3. Autres transmission .....	67
2.3. Dengue .....	68
2.4. Chikungunya.....	71
2.5. Zika .....	74
2.6. Prévention et lutte antivectorielle .....	76
2.6.1. Lutte anti-vectorielle individuelle .....	76
a) La protection personnelle anti-vectorielle (PPAV) .....	76
b) Elimination des gîtes larvaires.....	79
2.6.2. Lutte anti-vectorielle collective .....	80
a) Action sur l'environnement.....	80

<u>Destruction des gîtes larvaires</u> .....	80
<u>Lutte insecticide</u> .....	80
<u>Lutte biologique</u> .....	80
b)    Education sanitaire.....	81
c)    Maladie à déclaration obligatoire (MDO) .....	82
<b>PARTIE 3 : Facteurs favorisant l'émergence du moustique tigre en France métropolitaine.....</b>	<b>83</b>
<b>1.    Rôles des activités humaines sur l'endémisation <i>d'Aedes albopictus</i> sur de nouveaux territoires .....</b>	<b>83</b>
1.1.    Des activités humaines support de la migration <i>d'Aedes albopictus</i> .....	83
1.1.1.    L'histoire d'une invasion tout autour du globe .....	83
1.1.2.    L'invasion du territoire français métropolitain.....	85
1.2.    Anthropisation des milieux .....	90
1.2.1.    Apparition de nouveaux gîtes.....	91
1.2.2.    Des températures moyennes plus chaudes.....	93
1.2.3.    Bouleversement de la biodiversité lié aux activités humaines.....	94
1.2.4.    Une concentration des populations humaines hôtes.....	95
<b>2.    Rôle du changement climatique sur l'endémisation <i>d'Aedes albopictus</i> et le développement d'arboviroses 98</b>	
2.1.    Changement climatique et maladies infectieuses .....	98
2.2.    Changement climatique, <i>Aedes albopictus</i> et arboviroses .....	100
2.2.1.    Température et écologie vectorielle .....	101
a)    Le vol et la recherche d'hôtes .....	101
b)    Le cycle de développement et dynamique des populations .....	102
2.2.2.    Précipitations et écologie des vecteurs .....	103
2.2.3.    Climat, habitat et écologie des vecteurs .....	103
a)    Humains et paysages.....	104
b)    Paysages et moustiques .....	105
2.3.    Projection sur le changement climatique et la présence du moustique tigre .....	106
<b>3.    Arboviroses émergentes en France métropolitaine .....</b>	<b>108</b>
<b>Conclusion.....</b>	<b>110</b>
<b>Bibliographie.....</b>	<b>111</b>
<b>Table des matières .....</b>	<b>123</b>
<b>Table des illustrations .....</b>	<b>127</b>
<b>Table des tableaux .....</b>	<b>130</b>
<b>Annexe .....</b>	<b>131</b>

# Table des illustrations

Figure 1 : Cartographie des climats (4) .....	3
Figure 2 : Puissance surfacique moyenne de l'irradiation solaire reçue en une année sur une surface donnée de la Terre (8) .....	8
Figure 3 : Variations surfaciques de l'énergie solaire captée à la surface de la Terre en fonction de la latitude (9) .....	8
Figure 4 : Variations saisonnières de l'énergie solaire captée à la surface de la Terre (10) .....	9
Figure 5 : Cycle de l'eau (12) .....	10
Figure 6 : Circulation des vents et effet de Coriolis (15) .....	12
Figure 7 : Circulation océanique thermohaline (18) .....	13
Figure 8 : Carte des courants de surfaces. Les flèches bleues représentent les courants de surface froids et les flèches rouges les courants de surface chauds (18) .....	14
Figure 9 : La circulation thermohaline en profondeur (18) .....	15
Figure 10 : Oscillation australe El Nino et La Nina (21) .....	16
Figure 11 : Impact d'El Nino sur les climats du globe (22) .....	17
Figure 12 : Impact de La Nina sur les climats du globe (22) .....	17
Figure 13: Carte de l'Oscillation Nord-Atlantique (NAO) en fonction de l'indice positif ou négatif (24) .....	18
Figure 14 : Relation entre RCP et SSP selon T. Kram (27) .....	19
Figure 15 : Evolution de la température moyenne mondiale de 1850 à 2019 (28) .....	20
Figure 16 : Bilan de masse des glace du Groenland de 2002 à 2019 (28) .....	22
Figure 17 : Bilan radiatif de la Terre (35) .....	25
Figure 18 : Flux annuel net en fonction de l'origine du CO2 de 2009 à 2018 (38) .....	27
Figure 19 : Evolution mensuelle moyenne du SF6 et des principaux hydrocarbures halogénés. (a) SF6 et halocarbures à faible fraction molaire ; (b) halocarbure à fraction molaire plus élevée (41) .....	29
Figure 20 : Rôle de l'albédo dans l'absorption et la réflexion des rayons solaires (45) .....	31
Figure 21 : Impact des facteurs sur la forçage radiatif de 1750 à 2019 en $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ (48) .....	32
Figure 22 : Evolution du forçage radiatif effectif de 1750 à 2019 (48) .....	32
Figure 23 : Evolution des émissions par an des GES en fonction des 5 scénarios SSP définis par le GIEC en 2021 (52) .....	35
Figure 24 : Projection de l'évolution des températures moyennes annuelles de 2015 à 2100 .....	36
Figure 25 : Projection d'évolution des températures moyennes annuelles par pays dans un scénario de réchauffement de la température annuelle moyenne globale à $+3^\circ\text{C}$ d'ici 2100 (par rapport à la période préindustrielle) (53) .....	36
Figure 26 : Augmentation du niveau des océans en fonction des scénarios du GIEC (52) .....	37
Figure 27 : Simulation de l'évolution des précipitations mondiales annuelles en fonction de scénarios d'augmentation de la température moyenne annuelle globale à $+1,5^\circ\text{C}$ (gauche), à $+2^\circ\text{C}$ (centre) et à $+4^\circ\text{C}$ (droite) par rapport à la période préindustrielle (54) .....	38

Figure 28 : : Impact d'un réchauffement climatique mondial annuel moyen de +2°C par rapport à la période de référence climatologique (1960-2014) sur l'augmentation de la fréquence des événements climatiques extrêmes en fonction des régions du monde (52).....	39
Figure 29: Les climats de la France métropolitaine (55) .....	40
Figure 30: Ecart de la température annuelle moyenne par rapport à la température moyenne de la période de référence (1961-1990) (52).....	41
Figure 31: Carte des zones exposées à l'élévation du niveau des océans d'un mètre (à marée haute), élaborée par le BRGM (57).....	42
Figure 32 : Cartographie de l'indicateur national de l'érosion côtière (60) .....	43
Figure 33: Variation dans l'épaisseur des glaciers métropolitains (en m) de 1907 à 2015 (52).....	44
Figure 34: Variations de l'eau en mètres du glacier d'Ossoue depuis 2001 (52).....	45
Figure 35: Nombre moyen de jour par an dont l'indice forêt météo (IFM) est supérieur à 40 pour la période 1961-1980 (carte de gauche) et d'ici 2060 (carte de droite) selon le scénario A1B (63). L'IFM est une estimation du risque d'occurrence d'un feu de forêt.....	46
Figure 36: Morphologie générale d'une larve de <i>Culicinae</i> ( <i>Culex</i> ) (73) .....	49
Figure 37: Morphologie de la nymphe de moustique (a), avec son extrémité abdominale (b), sa palette natatoire (c) et sa trompette respiratoire (d) (74).....	51
Figure 38: Anatomie du stade imago (adulte) du moustique <i>Culex pipiens</i> (76).....	51
Figure 39: Anatomie de la tête du moustique adulte (77).....	52
Figure 40: Dimorphisme sexuel entre le moustique mâle et femelle ( <i>Aedes albopictus</i> ) (80) .....	53
Figure 41 : Coupe de l'organe suceur du moustique tigre ( <i>Aedes albopictus</i> ) femelle (74) .....	54
Figure 42: Cycle de vie du moustique tigre ( <i>Aedes albopictus</i> ) (83).....	56
Figure 43 : Répartition mondiale combinée de sept principales maladies à transmission vectorielle pour lesquelles l'intégration des programmes de lutte antivectorielle peut être bénéfique : paludisme, filariose lymphatique, leishmaniose, dengue, encéphalite japonaise, fièvre jaune et maladie de Chagas (92) .....	64
Figure 44 : Cycle de transmission et organes cibles (94).....	65
Figure 45 : Représentation d'un modèle transmission d'une infection vectorielle (97).....	66
Figure 46 : Les différentes étapes d'infection du moustique par un arbovirus (96) .....	66
Figure 47 : Carte mondiale du risque de transmission de la dengue (100) .....	68
Figure 48 : Vaccin Dengvaxia® mis au point par Sanofi Pasteur (107) .....	70
Figure 49 : Carte de présence du chikungunya dans le monde (112) .....	71
Figure 50 : Carte de présence du virus Zika dans le monde (112) .....	74
Figure 51 : Lieu potentiel de gîte larvaire et mesure adaptée d'élimination (128) .....	79
Figure 52 : Dispersion mondiale d' <i>Aedes albopictus</i> (141) .....	84
Figure 53: Distribution géographique mondiale d' <i>Aedes albopictus</i> . Les points rouges représentent les données d'occurrences (N = 38367) obtenues à partir des données du projet Global Biodiversity Information Facility (GBIF) (142).....	84
Figure 54 : Diffusion d' <i>Aedes albopictus</i> dans les départements de métropole de 2004 à 2012 (146) ....	86
Figure 55: Diffusion d' <i>Aedes albopictus</i> dans les départements de métropole de 2013 à 2018 (146) ....	87
Figure 56 : Diffusion d' <i>Aedes albopictus</i> dans les départements de métropole de 2019 à 2021 (146) ....	88

Figure 57: Présence d' <i>Aedes albopictus</i> dans les départements de métropole depuis le 1 <sup>er</sup> janvier 2022 (146).....	89
Figure 58 : Pourcentage de la population française de métropole habitant des communes colonisées par <i>Aedes albopictus</i> en fonction de leur département de résidence au 1er janvier 2022 (146) .....	89
Figure 59 : Typologie des gîtes larvaires aquatiques selon l'EID méditerranée (155) .....	92
Figure 60 : Comparaison des flux de chaleurs entre les zones rurales et les zones urbaines de jour et de nuit (156) .....	93
Figure 61 : Evolution de la population urbaine en France métropolitaine depuis 1936 (en %) (163) .....	95
Figure 62: Evolution des superficies selon le type d'occupation du sol en France métropolitaine de 1982 à 2018 (164).....	96
Figure 63 : Relation entre le changement climatique et ses répercussions chez les humains (maladies, nutrition, conditions de vie) (166).....	98
Figure 64 : Diagramme des interactions entre des variables climatiques, les vecteurs et les virus (171) .....	100
Figure 65 : Modèle théorique reliant les personnes, les paysages et les moustiques (180) .....	104
Figure 66 : Présence du moustique tigre en Europe en mars 2022 (183) .....	106
Figure 67 : Simulation de la présence d' <i>Aedes albopictus</i> en Europe sur la base de projections climatiques futures pour la période 2045–2054 (scénario A2 issu du GIEC) (184) .....	107
Figure 68 : Nombre de cas autochtones de dengue, chikungunya et Zika enregistrés de 2010 à 2022 en France métropolitaine (187).....	108

## Table des tableaux

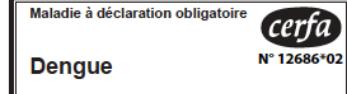
Tableau 1 : Tableau de la durée de vie dans l'atmosphère et des PRG des GES (30) .....	26
Tableau 2 : Evolution de la température mondiale à la surface de la Terre pour trois périodes de 20 ans au regard des 5 scénarios SSP étudiées par le GIEC pour l'AR6 (30) .....	33
Tableau 3 : Moyens de prévention disponibles contre les piqûres de moustiques (127).....	78
Tableau 4 : Répartition de la population française en 2017 selon la taille de l'unité urbaine (165).....	96
Tableau 5 : : Emergence des virus dengue, chikungunya et Zika en France métropolitaine .....	109

# Annexe

## Annexe 1 Fiche de notification d'un cas de dengue

République française

Médecin ou biologiste déclarant (tampon)		Si notification par un biologiste	
Nom : Hôpital/service : Adresse : Téléphone : Télécopie : Signature :		Nom du clinicien : Hôpital/service : Adresse : Téléphone : Télécopie :	



Important : tout cas de dengue doit être signalé immédiatement par tout moyen approprié (téléphone, télécopie...) au médecin de l'ARS.

Initial du nom :  Prénom : ..... Sexe :  M  F Date de naissance :

Code d'anonymat :             Date de la notification :

Code d'anonymat :             Date de la notification :

Sexe :  M  F Date de naissance :       Code postal du domicile du patient :

### Résultats biologiques :

Type d'examen	1 <sup>er</sup> prélèvement		2 <sup>er</sup> prélèvement		Résultats
	Date	Résultats	Date	Résultats	
PCR	<input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/>	<input type="checkbox"/> positif <input type="checkbox"/> négatif <input type="checkbox"/> ne sait pas	<input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/>	<input type="checkbox"/> positif <input type="checkbox"/> négatif <input type="checkbox"/> ne sait pas	
NS1	<input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/>	<input type="checkbox"/> positif <input type="checkbox"/> négatif <input type="checkbox"/> ne sait pas	<input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/>	<input type="checkbox"/> positif <input type="checkbox"/> négatif <input type="checkbox"/> ne sait pas	
IgM	<input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/>	<input type="checkbox"/> positif <input type="checkbox"/> négatif <input type="checkbox"/> ne sait pas	<input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/>	<input type="checkbox"/> positif <input type="checkbox"/> négatif <input type="checkbox"/> ne sait pas	
IgG	<input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/>	<input type="checkbox"/> positif <input type="checkbox"/> négatif <input type="checkbox"/> ne sait pas	<input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/>	<input type="checkbox"/> positif <input type="checkbox"/> négatif <input type="checkbox"/> ne sait pas	

Dengue	
Critères de notification	
Fièvre >38,5 °C de début brutal	ET
au moins un signe algique (myalgies ± arthralgies ± céphalées ± lombalgies ± douleur retro-orbitaire)	ET
au moins un des critères biologiques suivants :	
RT-PCR ou test NS 1 ou IgM positifs	
OU séroconversion	
OU augmentation x4 des IgG sur deux prélèvements distants.	

### Clinique :

Date du début des signes :

Fièvre :  oui  non  ne sait pas

Signes algiques :  oui  non  ne sait pas

- myalgies :  oui  non  ne sait pas - céphalées :  oui  non  ne sait pas

- arthralgies :  oui  non  ne sait pas - douleurs rétro-orbitaires :  oui  non  ne sait pas

- lombalgies :  oui  non  ne sait pas - autres signes, préciser : .....

### Signes de gravité :

- saignement sévère :  oui  non  ne sait pas - altérations de la conscience :  oui  non  ne sait pas

- choc :  oui  non  ne sait pas - atteinte cardiaque ou autre organe :  oui  non  ne sait pas

### Biologie

Plaquettes :  ≤ 50 000/mm<sup>3</sup>  50 000 < plaq. ≤ 100 000/mm<sup>3</sup>  > 100 000/mm<sup>3</sup>

Augmentation de l'hématocrite ≥ 20 % (par rapport normale labo) :  oui  non  ne sait pas

### Evolution :

Hospitalisation :  oui  non  ne sait pas Si oui, durée de l'hospitalisation en jours :

Guérison :  oui  non  ne sait pas Décès :  oui  non  ne sait pas

### Exposition dans les 15 jours avant la date de début des signes (plusieurs réponses possibles) :

Séjour à l'étranger :  oui  non  ne sait pas

Si oui, préciser le(s) pays : ..... Date de retour :

Séjour dans un département en dehors du département de résidence principale :  oui  non  ne sait pas

Si oui, préciser le(s) départements : ..... Date de retour au domicile :

### Déplacement dans les 7 jours après la date de début des signes (période virémique) :

Séjour dans un département en dehors du département de résidence principale :  oui  non  ne sait pas

Si oui, préciser le(s) départements : .....

### Autre(s) cas dans l'entourage :

oui  non  ne sait pas Si oui, combien de cas :

Médecin ou biologiste déclarant (tampon)	Si notification par un biologiste	ARS (signature et tampon)
Nom : Hôpital/service : Adresse : Téléphone : Télécopie : Signature :	Nom du clinicien : Hôpital/service : Adresse : Téléphone : Télécopie :	

# ROGLIANO Edouard

## RÉSUMÉ

### Rôle du réchauffement climatique et des activités humaines dans l'émergence du moustique tigre (*Aedes albopictus*) en France métropolitaine.

La révolution industrielle a permis un essor technologique considérable grâce à l'utilisation en masse des énergies fossiles. Depuis cette période leur consommation n'a cessé d'augmenter et a entraîné un bouleversement des activités humaines impactant directement les écosystèmes et indirectement le climat.

Profitant de ces bouleversements, le moustique tigre (*Aedes albopictus*) originaire d'Asie du sud-est a étendu son territoire pour se retrouver en 2022 dans 67 des 96 départements de France métropolitaine. Sa capacité à transmettre des arboviroses fait de son implantation un enjeu de santé publique majeur.

Mieux comprendre l'impact de nos activités humaines sur les écosystèmes et le rôle qu'elles jouent sur l'implantation du moustique tigre en France métropolitaine est un prérequis à la mise en place d'une réponse globale.

**Mots-clés :** Moustique tigre, *Aedes albopictus*, dengue, Zika, chikungunya, changement climatique, gaz à effet de serre, maladies vectorielles, arbovirus.

## ABSTRACT

### The role of global warming and human activities in the emergence of the tiger mosquito (*Aedes albopictus*) in mainland France.

The industrial revolution allowed a considerable technological development thanks to the mass use of fossil fuels. Since then, their consumption has continued to increase and has led to an upheaval in human activities, directly impacting ecosystems and indirectly the climate.

Taking advantage of these upheavals, the tiger mosquito (*Aedes albopictus*), which originates from South-East Asia, is expanding its territory and by 2022 will be found in 67 of the 96 départements of mainland France. Its ability to transmit arboviruses makes its presence a major public health issue.

A better understanding of the impact of our human activities on ecosystems and the role they play in the establishment of the tiger mosquito in mainland France is a prerequisite for the implementation of a global response.

**Keywords :** Tiger mosquito, *Aedes albopictus*, dengue, Zika, chikungunya, climate change, greenhouse gases, vector-borne diseases, arbovirus.