



**HAL**  
open science

## Impacts des changements climatiques

Sophie Laval-Szopa, Nathalie de Noblet Ducoudré, Laurent Bopp, Rémy Slama, Cécile Tran Kiem

► **To cite this version:**

Sophie Laval-Szopa, Nathalie de Noblet Ducoudré, Laurent Bopp, Rémy Slama, Cécile Tran Kiem. Impacts des changements climatiques. Enjeux de la transition écologique, EDP Sciences, 23p, 2021, 978-2-7598-2662-9. hal-03479323

**HAL Id: hal-03479323**

**<https://universite-paris-saclay.hal.science/hal-03479323v1>**

Submitted on 14 Dec 2021

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

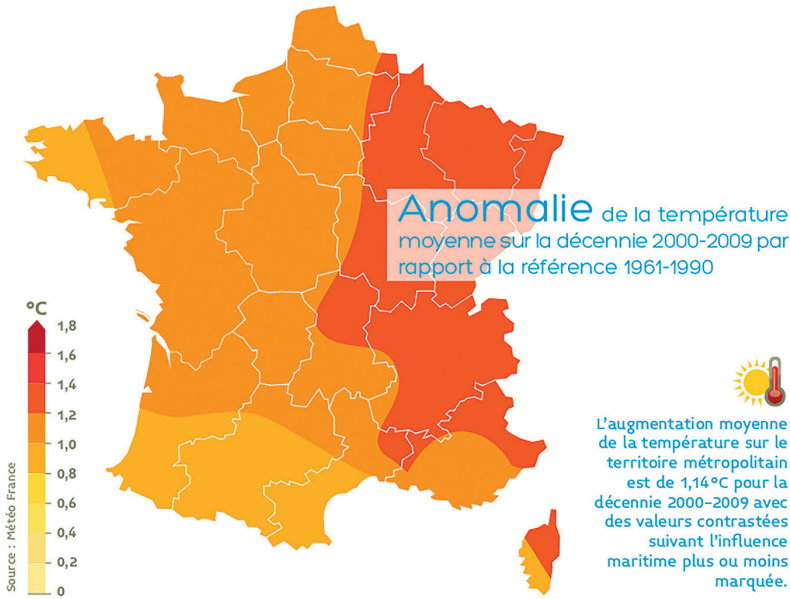
# Chapitre 8

## Impacts des changements climatiques

Depuis la fin du siècle dernier, le réchauffement climatique se manifeste non seulement par l'élévation de température moyenne, mais aussi par des **sécheresses** chroniques ou à répétition, des précipitations d'ampleur accrue, et des tempêtes de plus en plus dévastatrices. Ce chapitre présente des exemples de telles manifestations en France et dans différentes régions du monde, ainsi que leurs évolutions prévisibles pour les années à venir. Il décrit aussi de façon plus précise les impacts du changement climatique sur les cultures et la végétation, sur les océans et les **écosystèmes** marins et sur la santé humaine. Comme nous le verrons, peut-être une menace forte et étendue porte-t-elle dès à présent sur les **espèces** marines en raison de l'acidification et de la désoxygénation des océans. Nous verrons aussi que l'élévation de température se traduit par un risque accru de mortalité pour les populations humaines. En Europe, les populations vivant dans les régions du sud sont les plus menacées. Le changement climatique est aussi susceptible d'augmenter l'incidence des maladies à transmission vectorielle dans des zones aujourd'hui tempérées.

### 8.1. Manifestations du changement climatique en France et ailleurs dans le monde – S. Szopa

Selon le rapport spécial du **GIEC** sur les conséquences d'un réchauffement à 1,5° C, la température moyenne à la surface du globe a augmenté d'environ 1° C en France depuis 1850. En France, Météo France rapporte une hausse de la température moyenne observée de 1,7 °C depuis 1900. La décennie 2010-2019 a été plus chaude de 0,19 °C que la décennie 2000-2009, elle-même plus chaude de 0,47 °C que la décennie 1951-1990 (**Fig. 8.1**). La température moyenne s'est ainsi élevée de 0,66 °C entre 1951 et 2019. Les cinq dernières années sont les plus chaudes jamais observées depuis 1850 et, avec un écart de +2,3 °C par rapport à la moyenne 1951-1990, l'année 2020 a été en France métropolitaine l'année la plus chaude depuis 1900.



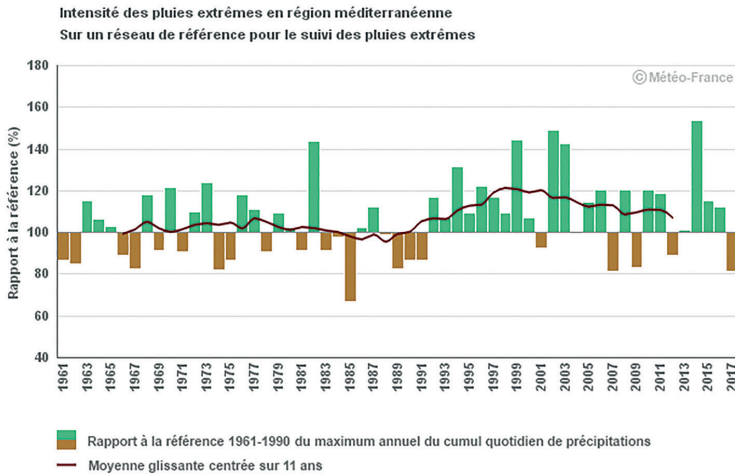
**Figure 8.1:** Anomalie de température : différence entre la moyenne de température de la décennie 2000-2009 et la moyenne de température de la décennie 1951-1990. Notons qu'il est nécessaire de moyenner sur au moins dix ans de données météorologiques pour pouvoir étudier les variations de climats. Source : Météo France<sup>68</sup>.

Cette élévation de température s'accompagne d'effets sur les précipitations, les **vagues de chaleur**, l'enneigement, les **sécheresses**, et augmente la fréquence des événements extrêmes.

Les précipitations ont évolué différemment d'une région à l'autre. Ainsi, sur la période 1959-2009, on constate généralement une hausse des précipitations annuelles dans la moitié nord et une baisse dans la moitié sud. Une tendance à plus de pluie au printemps et en automne sur toute la France et une baisse des cumuls sur les régions proches de la Méditerranée malgré une intensification des pluies extrêmes dans les régions méditerranéennes françaises.

Le pourtour méditerranéen fait partie des régions particulièrement vulnérables au changement climatique en raison de sa topographie particulière (mer fermée bordée de reliefs et au nord d'immenses déserts). Typiques de ce **climat** méditerranéen, les fortes précipitations automnales, liées à des orages d'automne induits par une mer encore chaude et une **atmosphère** plus froide, et pouvant être à l'origine de crues éclairs, se sont fait plus nombreuses et plus intenses ces dernières années comme l'indique la **figure 8.2**.

68. [https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/ONERC\\_Brochure\\_impacts\\_en\\_France\\_PDF\\_WEB.pdf](https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/ONERC_Brochure_impacts_en_France_PDF_WEB.pdf)



**Figure 8.2:** Intensité des événements pluvieux extrêmes méditerranéens de 1961 à 2017 par rapport à une moyenne sur une période de référence de 1961 à 1990<sup>69</sup>.

Depuis le milieu du XX<sup>e</sup> siècle, on observe aussi des évolutions de la fréquence et de l'intensité des événements extrêmes. Ainsi, on assiste à une augmentation du nombre de journées chaudes pour lesquelles les températures maximales sont supérieures à 25 °C. Les **vagues de chaleur** sont devenues plus fréquentes et plus intenses, par exemple, en 2019, les **vagues de chaleur** exceptionnelles ont provoqué des températures inédites de 46 °C dans le sud de la France. L'évaporation des sols s'accroît, induisant des **sécheresses** plus fréquentes et plus intenses. Le nombre de jours de gel diminue et la durée de la période d'enneigement en moyenne montagne diminue également. En revanche, aucune tendance marquée ne se dégage sur l'évolution des tempêtes.

En France, l'ONERC (Observatoire National sur les effets du réchauffement climatique) suit une trentaine d'indicateurs mesurables et témoignant des effets du changement climatique pour en documenter la progression et adapter les politiques d'adaptation<sup>70</sup>.

À l'avenir, on s'attend à un renforcement de ces manifestations, comme l'illustre la **figure 8.3**, avec également une augmentation des risques dont l'occurrence est liée, en tout ou partie, aux paramètres climatiques comme les feux de forêt ou les inondations. Au-delà de 2050, l'intensification ou non de ces effets dépend, pour beaucoup

69. b) <https://www.ecologie.gouv.fr/impacts-du-changement-climatique-atmosphere-temperatures-et-precipitations>

70. a) <https://meteofrance.com/changement-climatique/observer/le-changement-climatique-en-france>  
 b) <https://www.ecologie.gouv.fr/impacts-du-changement-climatique-atmosphere-temperatures-et-precipitations>  
 c) [https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/ONERC\\_Brochure\\_impacts\\_en\\_France\\_PDF\\_WEB.pdf](https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/ONERC_Brochure_impacts_en_France_PDF_WEB.pdf)

d'entre eux, des politiques mondiales d'atténuation des émissions de gaz à effet de serre mises en place dans les décennies à venir. C'est moins le cas pour les risques liés à la montée des eaux océaniques, car cette variable répond de manière décalée dans le temps aux perturbations climatiques.

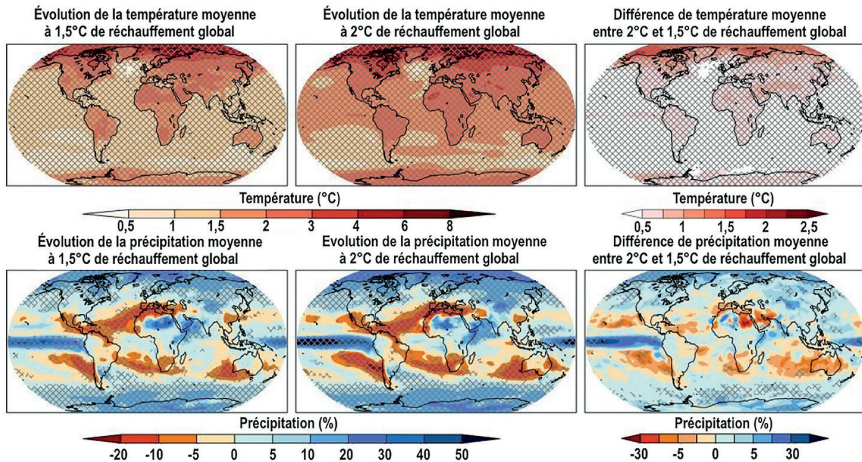
On note également que les territoires d'outre-mer vont, de par leur situation géographique, être affectés par des risques différents de ceux de la métropole. Pour les territoires situés dans les régions tropicales et régulièrement frappés par des cyclones tropicaux, aucune tendance certaine ne s'est dégagée quant à une augmentation de leur nombre au cours des dernières décennies (ONERC basé sur GIEC, 2014). En revanche, il est quasiment certain que l'intensité et la fréquence des cyclones les plus forts ont augmenté depuis 1970 dans le bassin Atlantique Nord, dans lequel se situent les Antilles. Pour ce qui concerne l'avenir, il subsiste encore de grandes incertitudes sur l'évolution à attendre des cyclones tropicaux, même pour les scénarios avec les plus fortes concentrations de gaz à effet de serre. Il est probable que d'ici la fin du XXI<sup>e</sup> siècle, le nombre de cyclones soit diminuera, soit ne changera pas, tandis que la force maximum des vents et les quantités de pluie associées devraient augmenter. Autrement dit, les cyclones risquent d'être plus dangereux (GIEC, 2014).



**Figure 8.3 :** Carte des impacts liés au changement climatique déjà visibles et à venir en 2050. Source : Météo France<sup>71</sup>.

71. <https://www.ecologie.gouv.fr/observatoire-national-sur-effets-du-rechauffement-climatique-onerc>

Nous venons de voir très brièvement les effets du changement climatique en France, mais qu'en est-il ailleurs dans le monde? Tout d'abord, il faut noter que le réchauffement se manifeste de manière hétérogène. Il est notamment plus fort au-dessus des continents et aux pôles (Fig. 8.4).



**Figure 8.4:** Projection des changements de température moyenne (en haut) et de précipitations moyennes (en bas) pour un réchauffement moyen planétaire de 1,5°C (à gauche) et 2°C (au milieu) en prenant pour référence la période préindustrielle (1861-1880). Les zones hachurées représentent les zones où plus de deux tiers des modèles (au moins 18 sur 26) s'accordent sur le signe du changement et sont donc les zones où les résultats sont considérés comme robustes. Source: SRI.5 IPCC, Chapitre 3<sup>72</sup>.

Les changements de précipitations vont également être hétérogènes avec des renforcements des précipitations sur les régions recevant déjà à l'heure actuelle beaucoup de précipitations, comme le nord de l'Europe ou certaines régions tropicales humides, et un renforcement de l'aridité dans des zones déjà sèches telles l'Afrique et le sud de l'Europe.

Certaines zones vont subir des changements plus importants que d'autres. C'est le cas des zones littorales ou des zones plates et de basse altitude, en Asie notamment, qui vont être particulièrement impactées par l'élévation du niveau marin favorisant des inondations. Or, plus de 50% de la population mondiale vit à moins de 100 km des côtes. Les îles sont aussi, à l'évidence, fortement menacées par la montée des eaux avec, d'ores et déjà, des migrations liées à cette montée des eaux<sup>73</sup>.

La fonte des glaciers menace également l'approvisionnement en eau potable de régions entières. C'est, en particulier, le cas de la région himalayenne où la neige et l'eau des glaciers sont la source principale d'eau des rivières asiatiques dont dépendent plus d'un milliard d'individus en Inde, en Chine et au Pakistan.

72. <https://www.ipcc.ch/sr15/chapter/chapter-3/>

73. <http://storymaps.esri.com/stories/2017/climate-migrants/index.html>

## 8.2. Comment le climat impacte-t-il les écosystèmes terrestres ? – N. de Noblet-Ducoudré

Nous avons vu précédemment comment l'Homme peut perturber le [climat](#) en perturbant les [écosystèmes](#), à travers les usages qu'il fait des terres (voir section 7.4). Nous allons voir maintenant comment le changement climatique affecte les [écosystèmes](#), et réfléchir aux conséquences que ces impacts peuvent avoir, en retour, sur le climat.

On a tendance à résumer le changement climatique au réchauffement global, mais ce n'est pas la variation progressive de la température moyenne annuelle qui va affecter la croissance des plantes. Les plantes et les êtres vivants dans leur ensemble sont sensibles aux variations saisonnières et diurnes de température, à la disponibilité en eau, aux événements extrêmes comme les canicules ou les inondations.

Examinons deux variables climatiques, la température et les pluies, et regardons comment leur évolution impacte les [écosystèmes](#).

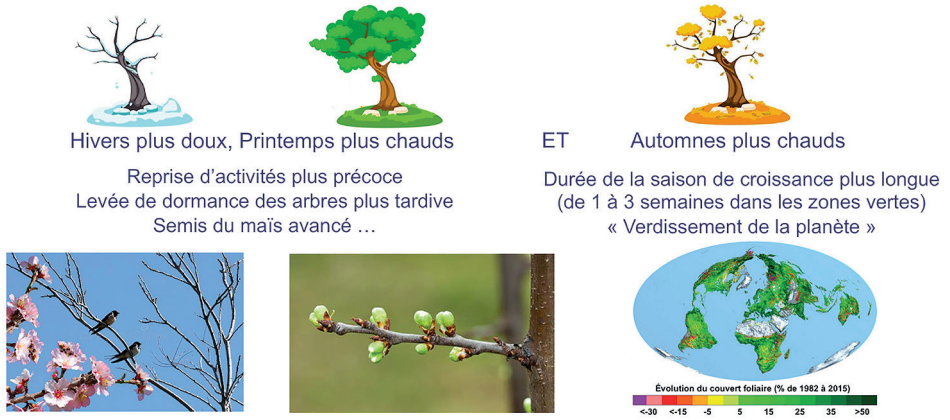
### 8.2.1. Les changements de température

- Le développement des [espèces](#) végétales est piloté par la température. L'apparition des nouvelles feuilles ou des fleurs, par exemple, dépend des conditions thermiques des semaines et des mois qui précèdent.

Il y a quatre aspects du changement climatique qui sont importants pour les plantes : les hivers plus doux, les printemps et automnes plus chauds, les températures extrêmes en été qui sont parfois trop chaudes ([Fig. 8.5](#)).

- Le réchauffement climatique, avec ses hivers plus doux et ses printemps plus chauds, a avancé la reprise d'activité des êtres vivants au printemps. Dans nos jardins, nous voyons les bourgeons sortir plus tôt qu'il y a dix ans par exemple, et les plantes fleurir plus tôt. Dans le monde agricole, les activités démarrent plus tôt : le maïs, par exemple, était semé mi-mai dans les années 1970, alors qu'on le sème mi-avril aujourd'hui, voire plus tôt.

Mais les hivers trop doux peuvent aussi avoir des effets néfastes. Certaines plantes ont besoin d'un certain nombre de jours de froid pendant l'hiver, c'est ce qu'on appelle la dormance qui correspond à un état d'inactivité physiologique qui permet à ces plantes de survivre à l'hiver sous nos latitudes. Un manque de froid hivernal peut provoquer un retard dans la reprise d'activité de la végétation. C'est ce que l'on voit déjà pour certains arbres fruitiers, par exemple, les pommiers dans certaines régions de France où la levée de dormance se fait aujourd'hui ~15 jours plus tard qu'en 1960.



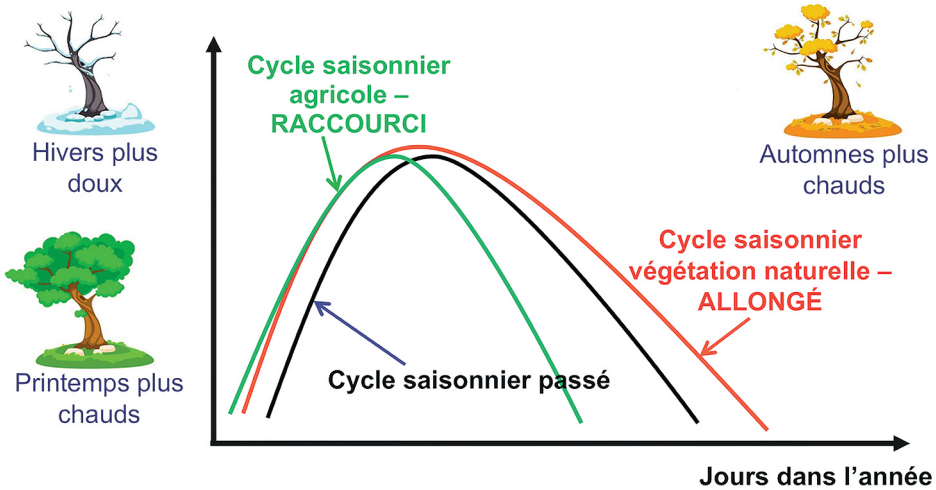
**Figure 8.5:** Influence du réchauffement climatique sur la végétation (Source : Nathalie de Noblet-Ducoudré). Verdissement de la planète (Source : Boston University / Ranga Myneni).

- À l'automne, le réchauffement a tendance à retarder le départ des oiseaux migrateurs et la fin de l'activité végétale. C'est, entre autres, pour cela que l'on parle du verdissement de la planète ! La durée de la saison de croissance de la végétation naturelle augmente. Elle augmente d'autant plus que l'on se trouve dans des régions froides, dans les zones boréales ou en altitude. Dans ces zones, le froid limite de moins en moins la croissance de la végétation. Il existe même des régions où les forêts se mettent à pousser naturellement alors que les arbres avaient autrefois du mal à survivre.
- Par contre, si l'on s'intéresse à l'agriculture, au lieu de s'allonger, le cycle cultural est plus court aujourd'hui que dans le passé. Une culture a besoin d'une certaine quantité de chaleur pour effectuer son cycle de vie complet. Quand le **climat** se réchauffe, ce cycle s'accomplit plus vite... la culture mûrit plus vite.
- C'est ce qui explique pourquoi la date des vendanges est de plus en plus précoce. Une vigne, qui se récoltait pendant la 2<sup>e</sup> quinzaine de septembre en 1960, se récolte aujourd'hui au mois d'août !

Nous pourrions parler plus en détail des effets de la température sur les végétaux mais cela serait trop long. Ce qu'il nous faut retenir ici :

- il y a un contraste entre la végétation naturelle, dont les cycles de croissance s'allongent, et l'agriculture dont les cycles raccourcissent (Fig. 8.6) ;
- il peut y avoir contradiction entre une levée de dormance plus tardive à cause des hivers doux, et une floraison plus précoce à cause de printemps plus chauds.





**Figure 8.6:** Évolution des cycles saisonniers avec le changement climatique. Source : Nathalie de Noblet-Ducoudré.

- Et enfin, les étés chauds sont plus fréquents et plus extrêmes. Or, les plantes comme les animaux, comme nous, peuvent souffrir de températures trop chaudes qui peuvent conduire au flétrissement pour la végétation et à des pertes de **rendement** très importantes en agriculture.

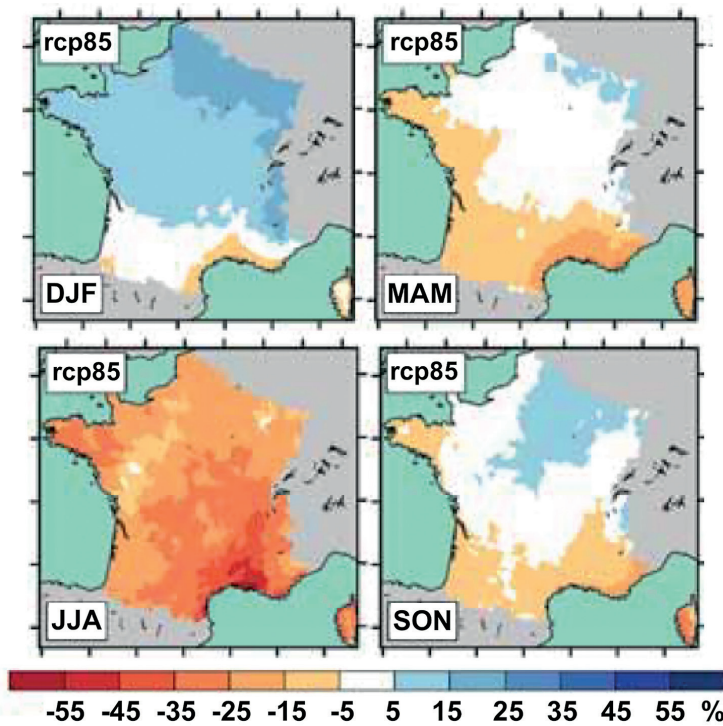
### 8.2.2. Les changements de précipitation

Il y a deux aspects importants du changement climatique concernant les précipitations (Fig. 8.7) :

- les cycles saisonniers sont souvent plus contrastés avec, en France par exemple, des hivers plus pluvieux et des étés plus secs. La **sécheresse** estivale est un problème pour la croissance des plantes ;
- les événements pluvieux sont plus intenses. Une pluie trop intense peut fragiliser les plantes par un impact trop fort ou conduire à des inondations qui risquent de faire pourrir les jeunes pousses.

Dans les régions où les précipitations ne changent pas beaucoup, le sol s'assèche car l'**évapotranspiration** augmente en réponse au réchauffement climatique. Cela peut être problématique pour la croissance des plantes si les sols contiennent moins d'eau.

En conclusion, comme nous l'avons montré rapidement, le **climat** affecte le développement de la végétation en perturbant notamment son calendrier.



**Figure 8.7 :** Évolution attendue des précipitations dans la France métropolitaine pour les 4 saisons, selon le scénario climatique le plus pessimiste (RCP8.5). Des hivers un peu plus humides (DJF : décembre, janvier, février), surtout dans le nord. Des étés beaucoup plus secs (JJA : juin, juillet, août), surtout dans le sud. Des changements un peu moins prononcés au printemps (MAM : mars, avril, mai) et en automne (SON : septembre, octobre, novembre). Source : [1].

Dans la section 7.4 de cet ouvrage, nous avons montré que la végétation impactait le climat, dû au fait qu'elle échangeait, entre autres, du  $\text{CO}_2$  et de la vapeur d'eau avec l'[atmosphère](#). Ici, nous montrons que, si la végétation joue un rôle important sur le climat, celui-ci perturbe significativement, en retour, son évolution suivant les saisons. Par exemple, dans les régions plutôt froides en zone boréale, si le réchauffement climatique conduit au développement des arbres, alors ces arbres vont amplifier le réchauffement initial. À la fin, le [climat](#) de ces régions sera différent sous l'effet combiné des émissions de [gaz à effet de serre](#) ET de la réponse de la végétation.

### 8.3. Acidification des océans et impacts sur les écosystèmes marins – L. Bopp

L'océan a un rôle clé dans le [système climatique](#) (voir section 7.1.1). Ce rôle est particulièrement important dans le cas du changement climatique [anthropique](#) – et ceci pour deux raisons majeures. L'océan absorbe la très grande majorité de

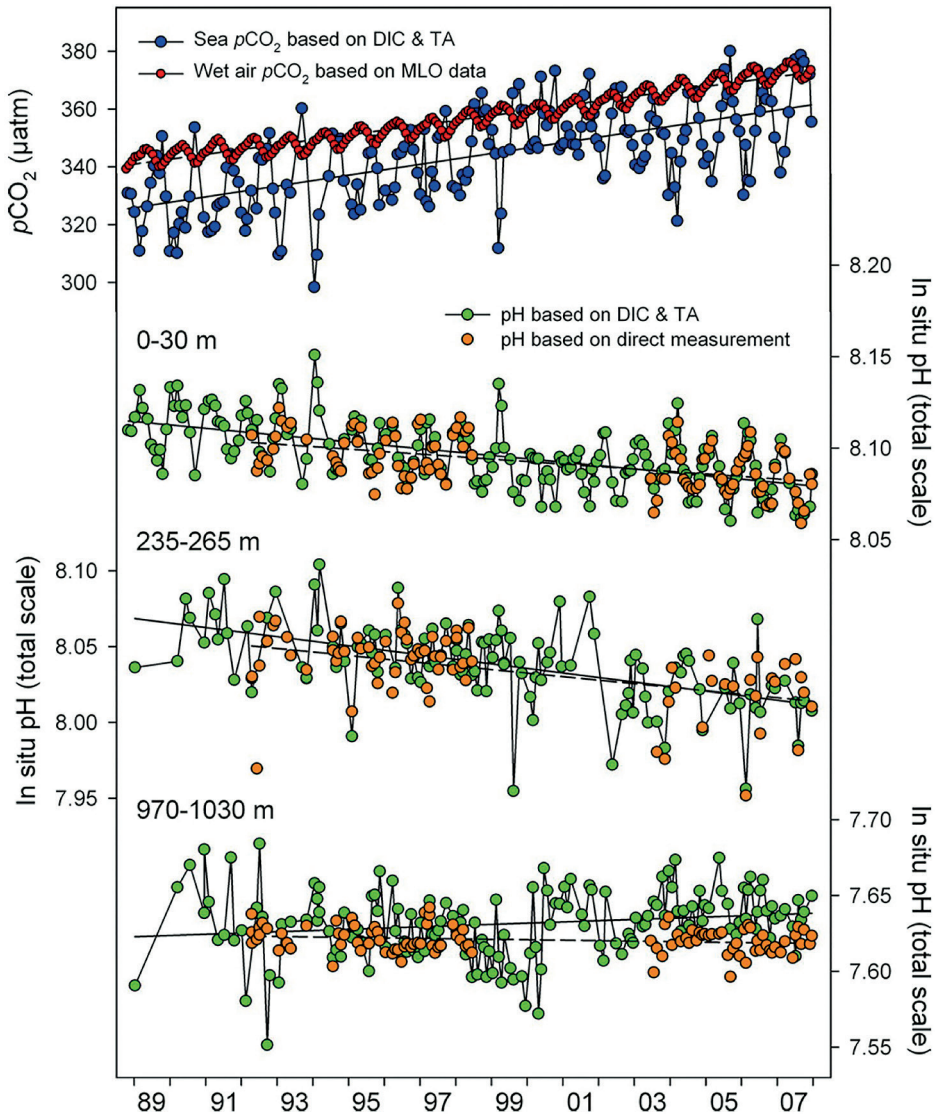
l'énergie en excès dans le système climatique, énergie qui est engendrée par l'augmentation des gaz à effet de serre. Mais l'océan absorbe aussi une part importante de nos émissions de carbone. En absorbant chaleur et carbone, l'océan nous fait gagner du temps et nous évite une catastrophe climatique encore plus grande.

### 8.3.1. Augmentation de la concentration de l'atmosphère en CO<sub>2</sub> et acidification des océans

Pour rappel, la concentration de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère a augmenté de près de 50 % depuis la révolution industrielle en raison des émissions produites par les activités humaines. Chaque année, l'océan absorbe près de 25 % de ces émissions anthropiques, ralentissant ainsi la vitesse à laquelle le CO<sub>2</sub> augmente dans l'atmosphère et perturbe le climat. Mais cette absorption n'est pas sans conséquence. On peut même dire que c'est une bien mauvaise nouvelle pour de nombreux organismes marins, car l'absorption de CO<sub>2</sub> est responsable de l'acidification de l'océan.

Une fois dissous dans l'eau de mer, le CO<sub>2</sub> forme un acide faible, l'acide carbonique de formule H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, qui va pouvoir se dissocier en libérant des protons (H<sup>+</sup>). En conséquence, plus l'océan absorbe de CO<sub>2</sub>, plus la concentration de H<sup>+</sup> augmente. C'est exactement ce que l'on mesure avec le pH (ou potentiel hydrogène) – attention quand le pH baisse, vous avez de l'eau de plus en plus acide et qui contient de plus en plus d'ions H<sup>+</sup>. Attention également, l'échelle de pH est une échelle logarithmique – à une baisse d'une unité pH correspond une multiplication par 10 des concentrations d'ions H<sup>+</sup> dans le milieu étudié.

La figure 8.8 met clairement en évidence la corrélation entre la diminution du pH mesuré dans l'océan Pacifique à la station marine ALOHA d'Hawaï (courbes du bas sur la figure) et l'augmentation de la pression partielle de CO<sub>2</sub> mesurée à la fois dans l'eau de surface (courbe du haut reliant les points bleus) et dans l'air humide environnant (courbe du haut reliant les points rouges). Les mesures du pH (courbes reliant les points verts) ont été effectuées à trois profondeurs et comparées à des valeurs calculées à partir du taux d'alcalinité de l'eau et de la quantité dissoute de CO<sub>2</sub> d'origine inorganique (courbes reliant les points ocres). La diminution du pH est bien vérifiée pour les mesures dans les eaux de surface et celles effectuées en moyenne profondeur. Le pH des eaux vers 1000 m de profondeur est relativement stable, mais l'acidité y est plus forte. De telles mesures ont démarré à la fin des années 1980 et se poursuivent régulièrement dans différentes stations de l'océan Pacifique et de l'océan Atlantique. Nous avons donc plus de 30 ans de recul sur l'évolution du pH, et le même signal se dégage dans l'Atlantique comme dans le Pacifique : le pH baisse ! C'est le signal de l'acidification de l'océan.



**Figure 8.8 :** Corrélation entre la diminution du pH de l'océan (en surface et moyenne profondeur) et l'augmentation de la pression partielle de  $\text{CO}_2$  mesurée dans l'eau de surface et dans l'air humide environnant. Études et mesures effectuées à la station d'ALOHA d'Hawaï. Source: Figure 1 de la référence [2].

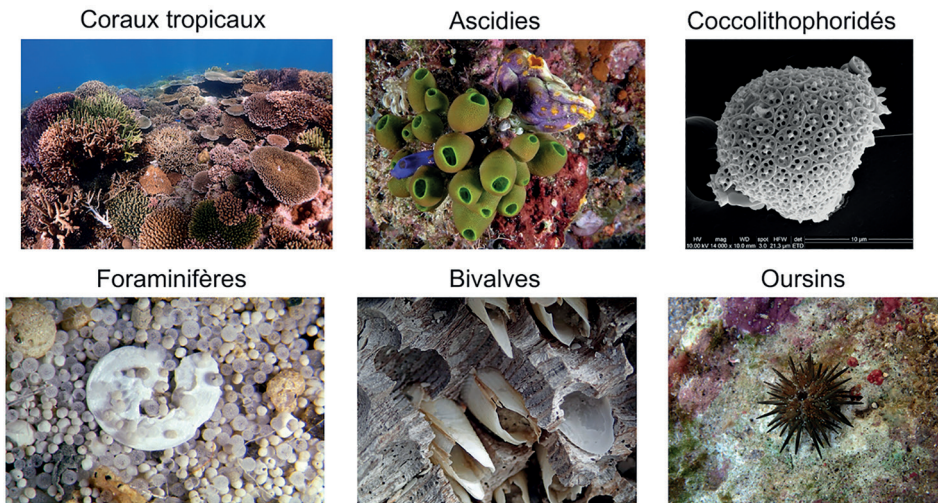
Comme on peut s'en douter, si nous continuons à émettre du  $\text{CO}_2$  au cours des prochaines années, l'acidification de l'océan se poursuivra. C'est ce que confirment les modèles climatiques, quel que soit le scénario d'émission de  $\text{CO}_2$ , que l'on ne fasse rien pour réduire cette émission (« *business as usual* ») ou que l'on parvienne à faire baisser ces émissions d'ici la fin du XXI<sup>e</sup> siècle.

À partir de 2050, cependant, les deux scénarios divergent pour aboutir à deux situations très contrastées en fin de siècle. Dans le cas où les émissions de CO<sub>2</sub> continuent à croître, la température de surface augmente de plusieurs degrés et le pH baisse de 0,4 unité pH en 2100. C'est une modification très importante de la chimie de l'eau de mer, qui correspond à une augmentation de la concentration des ions H<sup>+</sup> de 100 à 150% à la fin du XXI<sup>e</sup> siècle. Les conséquences pour la vie marine pourraient être dramatiques. Dans le cas où nous maîtrisons nos émissions de carbone, la baisse du pH est bien moindre. Nous limitons non seulement le changement climatique et le réchauffement de notre planète, mais aussi l'acidification de l'océan.

### 8.3.2. Conséquences de l'acidification sur les organismes marins

Alors, pourquoi devons-nous nous inquiéter de cette acidification? Les organismes marins les plus menacés sont, sans doute, les espèces calcifiantes, celles qui fabriquent des squelettes, des tests ou des coquilles en calcaire ou carbonate de calcium.

La figure 8.9 représente ainsi des exemples d'organismes menacés tels que les coraux tropicaux d'eaux chaudes, les coraux profonds d'eaux froides, les oursins, les bivalves qui incluent notamment les espèces utiles à l'homme comme les moules ou les huîtres, des organismes microscopiques, comme des foraminifères ou des algues également microscopiques au nom barbare de coccolithophoridés.



**Figure 8.9 :** Organismes marins calcifiant. Sources : @lstock (coraux tropicaux, ascidies, coccolithophoridés). Wikimedia Commons (foraminifères, bivalves, oursins).

Même si cela peut paraître contre-intuitif, plus l'océan contient de carbone, plus il est difficile pour ces organismes de se calcifier, c'est-à-dire plus il est difficile de synthétiser leurs coquilles ou leurs squelettes. Le paradoxe est que la calcification consiste justement à précipiter un ion calcium avec un ion carbonate qui contient du carbone.

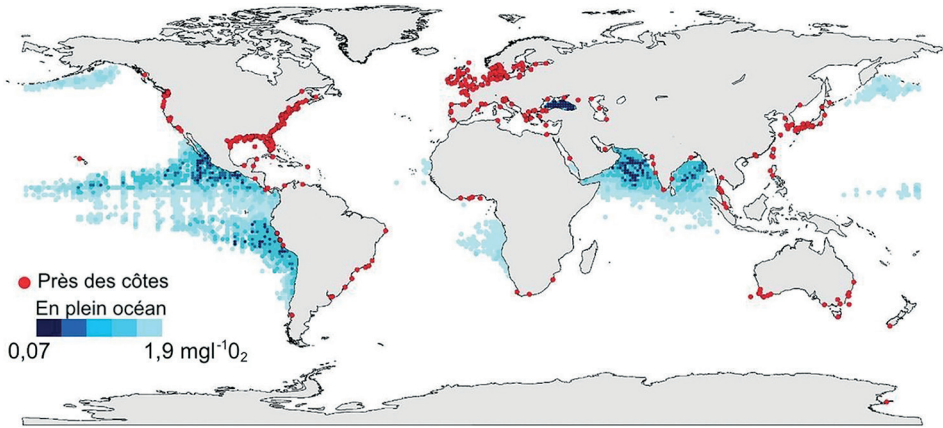
En fait, quand le  $\text{CO}_2$  en excès se dissout dans l'eau de mer, il réagit avec de l'eau et des ions carbonates pour donner des ions hydrogénocarbonates  $\text{HCO}_3^-$ . Plus l'océan absorbe de  $\text{CO}_2$ , plus la concentration d'ions carbonates diminue. Il y a donc de moins en moins d'ions carbonate disponibles pour la calcification. Cette diminution des ions carbonates est une autre manifestation de ce que l'on appelle l'acidification de l'océan.

Beaucoup d'études scientifiques, menées sur des organismes marins différents, ont montré les impacts de l'acidification sur le comportement, la reproduction, et la survie de ces organismes. Beaucoup de scientifiques étudient, par exemple, la réponse des espèces coralliennes. Nous soulignerons ici l'importance d'un autre type d'organisme calcifiant : le ptéropode qui est un petit escargot de mer dont la coquille fait quelques millimètres seulement, et qui est à la base de nombreuses chaînes alimentaires dans les océans polaires de l'hémisphère nord et de l'hémisphère sud.

Le comportement d'un ptéropode dans de l'eau « normale » est, en effet, fondamentalement différent de celui dans une eau acidifiée, qui correspondrait à la situation à la fin du XXI<sup>e</sup> siècle dans le cas d'un scénario où les émissions de  $\text{CO}_2$  ne cessent d'augmenter. Dans l'eau acidifiée, les mouvements du ptéropode sont difficiles et la coquille montre des signes de dissolution en raison de l'acidification. Cet état « végétatif » des ptéropodes dans un océan de plus en plus acide est donc aujourd'hui particulièrement alarmante sur l'évolution potentielle des écosystèmes marins associés à cette espèce.

### 8.3.3. Autres causes de dégradation des océans

Pour continuer avec les mauvaises nouvelles, il nous faut imaginer que l'acidification de l'océan n'est pas la seule menace qui pèse sur les écosystèmes marins. Au réchauffement de l'eau de mer que nous avons déjà mentionné et qui modifie l'aire de répartition de nombreuses espèces marines, il faut aussi ajouter un autre phénomène qui est celui de la désoxygénation de l'océan (Fig. 8.10). En effet, avec le changement climatique, l'océan perd de l'oxygène, parce qu'il est plus chaud et que le gaz  $\text{O}_2$  est moins soluble dans l'eau chaude. Cette désoxygénation peut aussi impacter de nombreuses espèces, en particulier, celles qui ont besoin d'oxygène pour la respiration.



**Figure 8.10:** Zones océaniques déficitaires en oxygène (moins de 2 mg/l), identifiées près des côtes (points rouges) ou en plein océan (points bleus). Source : GO2NE working group. Data from World Ocean Atlas 2013 and provided by R.J. Diaz.

Enfin, pour compléter le tableau des menaces qui pèsent sur les **écosystèmes marins**, il faut aussi tenir compte de pollutions, comme la pollution plastique, ou de la surpêche qui a déjà conduit à la disparition d'**espèces marines** dans certaines zones océaniques (voir section 5.3.1).

### 8.3.4. Des solutions pour lutter contre l'acidification des océans ?

Quelles solutions faut-il adopter, en particulier, pour lutter contre l'**acidification des océans** ? Certaines solutions pourraient être qualifiées de pis-aller ou même de fuite en avant ! Des industriels ostréicoles de la côte Ouest des États-Unis, face à la baisse des **rendements** en lien, semble-t-il, avec l'acidification des eaux, se sont ainsi déplacés dans d'autres régions du monde, comme à Hawaii, où l'acidité naturelle de l'eau de mer est moins élevée.

D'autres solutions s'identifient plus à des mesures d'adaptation comme le fait d'aider ces mêmes industriels à mieux anticiper les variations naturelles d'acidité de l'eau de mer, pour leur éviter d'exposer les larves de bivalves à des eaux plus acides.

De façon plus radicale, il a été imaginé de corriger de façon artificielle l'augmentation de l'acidité de l'eau de mer en ajoutant à l'eau des composés alcalins, comme ce qui se pratique dans une piscine pour corriger le pH. Cette solution peut sembler réaliste à une toute petite échelle, mais à l'échelle de l'océan mondial, les quantités d'additifs nécessaires seraient juste astronomiques...

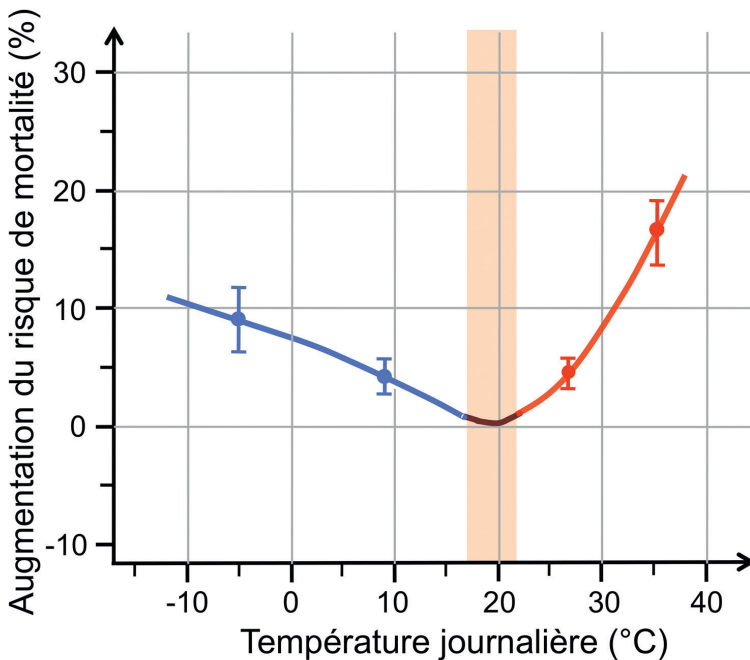
Bien évidemment, la seule vraie solution à grande échelle consiste à limiter, puis réduire fortement nos émissions de CO<sub>2</sub>, ce qui permettrait d'atténuer à la fois le changement climatique et l'acidification de l'eau de mer.

## 8.4. Impacts des changements climatiques sur la santé humaine – R. Slama et C. Tran Kiem

### 8.4.1. Température et santé humaine – R. Slama

La température a une influence claire et démontrée sur la santé humaine. Les connaissances épidémiologiques mettent en évidence une relation en « U » entre la température et la mortalité toutes causes confondues, telle que représentée sur la [figure 8.11](#). Autrement dit, on observe un accroissement de la mortalité aussi bien aux températures élevées qu'aux températures les plus basses et, entre ces températures extrêmes, une « zone de confort » où la mortalité est minimale.

Cette situation est résumée sur la [figure 8.11](#) qui provient d'une méthodologie que les épidémiologistes et les statisticiens appellent l'approche des *séries temporelles*. Elle consiste à mettre en relation les températures pendant une ou plusieurs journées successives dans une ville donnée avec la mortalité dans la même ville le jour même, le lendemain et dans les quelques jours qui suivent, en corrigeant éventuellement l'effet de facteurs dits de confusion. Ce sont donc uniquement des effets à court terme de la température que l'on peut ainsi mettre en évidence.

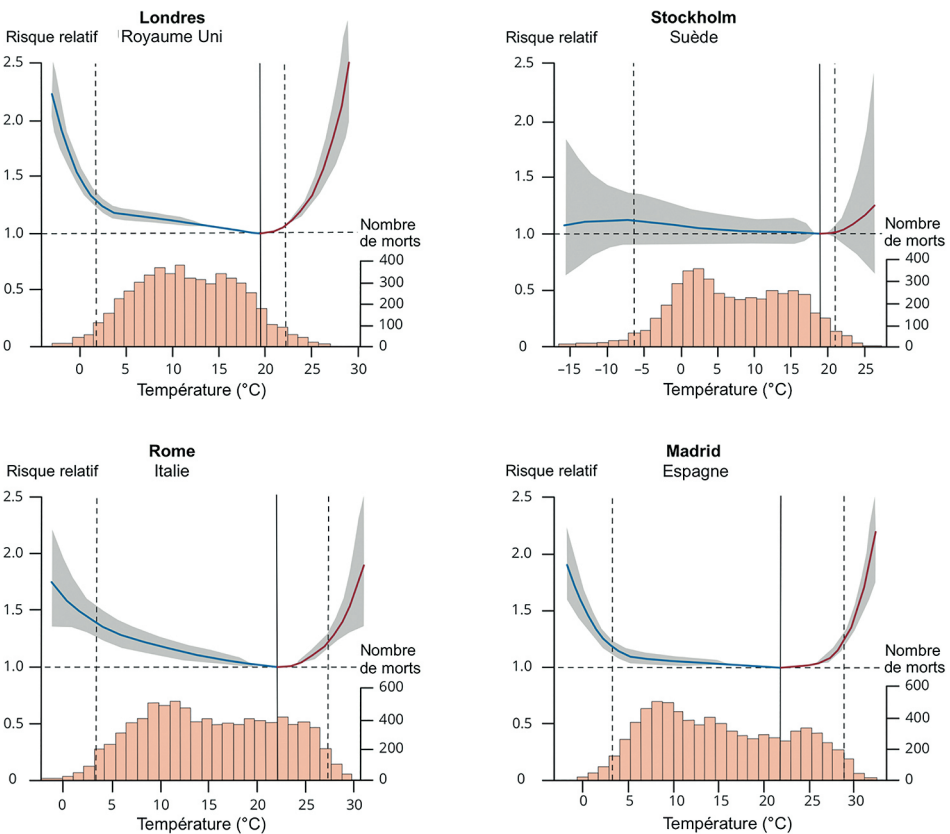


**Figure 8.11 :** Courbe typique en « U » d'évolution de la mortalité toutes causes confondues en fonction de la température journalière. Source : D'après les résultats de [3].



Il pourrait être tentant de chercher à comparer globalement la mortalité entre deux villes aux climats différents. En fait, cette comparaison serait assez difficile à faire, puisque les deux villes sont susceptibles de différer l'une de l'autre sur un grand nombre de facteurs pouvant influencer la santé. On serait en peine de déterminer la part effective de la température dans la différence de mortalité observée entre les deux villes. On écarte, au contraire, un grand nombre de biais avec l'approche « intra-ville » des séries temporelles, qui permet d'estimer plus aisément la relation à court terme entre température et mortalité. Cette approche prend, de plus, en compte un certain nombre de facteurs tels que les grandes tendances mensuelles ou annuelles dans la mortalité ainsi que la présence éventuelle d'épidémies, qui sont autant de « facteurs de confusion » potentiels.

Promenons-nous sur la planète et comparons les relations température-mortalité obtenues pour différentes villes (Fig. 8.12). On constate que la relation observée à Londres est très différente de celle observée à Stockholm.



**Figure 8.12:** Relations température-mortalité pour différentes villes d'Europe. Source: European Environment Agency (EEA), 2019. Voir aussi [4].

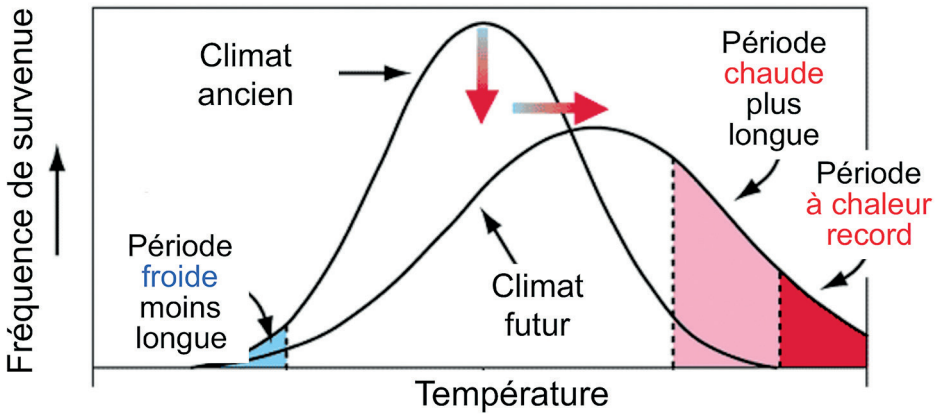
En Suède, la mortalité augmente aux températures élevées, comme on s'y attend, mais la mortalité varie peu dans une gamme étendue de basses températures. Ces différences méritent qu'on s'y attarde pour essayer de les expliquer : une hypothèse est que les Suédois sont habitués à ces basses températures, et donc en souffrent moins que les habitants de Londres ou Madrid. Comment une telle adaptation pourrait s'expliquer ? Probablement pas par des raisons génétiques, mais plutôt par des raisons sociétales liées au mode de vie (qualité de l'habitat, travail et temps passé en plein air...). Même si les températures s'abaissent fortement, ce fait est courant chez eux et leurs villes et modes de vie y sont adaptés. Les situations sont autres dans des villes comme Rome et Madrid. Dans une ville comme Madrid, la gamme de températures, où la mortalité est minimale, est relativement étendue, sans doute parce que les Madrilènes sont à la fois habitués à des étés très chauds et des hivers très froids.

Nous nous sommes déplacés d'une ville à l'autre. Restons maintenant dans un lieu donné et voyons s'il est possible de relier l'augmentation de mortalité aux températures élevées à une classe d'âge particulière ou à telle ou telle pathologie. Les travaux d'Antonio Gasparrini et ses collègues [5] montrent que si la mortalité est plus élevée, bien sûr, chez les personnes âgées que chez les personnes jeunes, *l'augmentation* de la mortalité aux températures élevées est observée parmi toutes les classes d'âge : la multiplication du risque de décès aux températures élevées est similaire aux différents âges de la vie. Ainsi, le problème n'est pas limité aux personnes âgées.

Quand on considère maintenant, de manière séparée, différentes pathologies ou causes de décès, on constate que le risque de décès est accru aussi bien pour les personnes souffrant de problèmes cardio-vasculaires que pour celles souffrant de problèmes respiratoires. Le risque de décès est également accru pour les autres causes de décès, y compris le suicide, mais avec une forme de la relation dose-réponse qui diffère : elle n'est plus en U mais monotone, avec un accroissement assez régulier du risque de décès par suicide des températures froides jusqu'aux températures élevées [6].

Cela suggère qu'il n'y a pas un mécanisme unique qui peut expliquer un effet lié aux températures, mais qu'il y a, selon les pathologies, différents mécanismes. Dans le cas de maladies cardiovasculaires, il est probable que le risque accru de mortalité est dû au fait qu'en période chaude, notre cœur travaille plus pour assurer la thermorégulation du corps, augmenter la transpiration, emmener le sang aux extrémités et favoriser la convection. Tout ceci fatigue les gens comme s'ils effectuaient un exercice d'endurance en permanence, augmentant ainsi le risque d'infarctus. Pour une autre cause de décès comme le suicide, un mécanisme supposé est que la température fait varier le niveau de sérotonine dans le corps. La sérotonine est une hormone impliquée dans le bien-être et un niveau déficitaire en sérotonine peut entraîner un état dépressif. En conséquence, les variations de sérotonine aux températures très élevées peuvent augmenter les états dépressifs et, par-là, le risque de suicide.

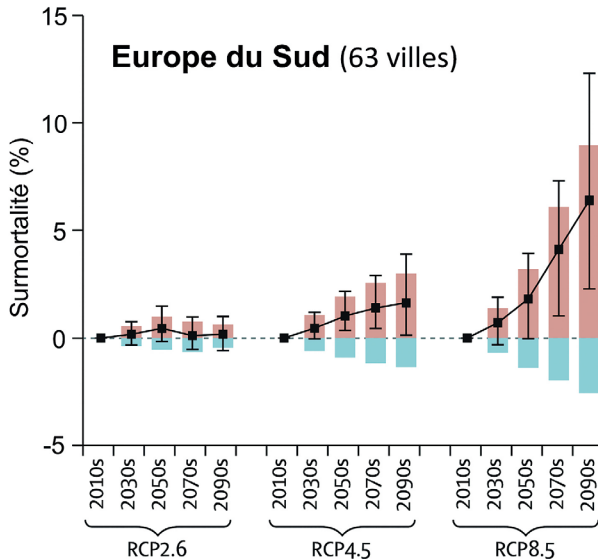
Essayons maintenant de changer d'échelle de temps pour placer ces connaissances dans la perspective du changement climatique. Quel peut être l'impact du changement climatique et du décalage des températures vers les températures élevées sur la mortalité? L'impact global n'est, en fait, pas si facile à prévoir car si le nombre de décès attribuables aux températures chaudes va vraisemblablement augmenter, il est aussi possible que dans certaines zones, le nombre de décès attribuables aux températures froides – moins fréquentes – diminue (Fig. 8.13). Une équipe d'épidémiologistes londoniens a néanmoins pu faire une première estimation de cet impact à partir de projections sur le climat futur, faites par les climatologues [7].



**Figure 8.13 :** Évolution de la distribution annuelle de température prédite pour le climat futur. Avec la courtoisie des membres du GIEC.

Les épidémiologistes prédisent ainsi que dans les pays d'Europe du Nord, on peut s'attendre à une diminution de la mortalité liée aux basses températures en hiver et à une augmentation, dans l'ensemble moins importante ou similaire, de la mortalité liée aux températures chaudes en été. Ainsi, globalement, l'impact net sur la mortalité sur une année est quasi-nul dans le nord de l'Europe, typiquement dans les pays scandinaves.

Si on descend au sud de l'Europe, par exemple, dans le sud de la France, on assistera à une certaine diminution de la mortalité hivernale, car les températures en hiver seront moins rudes, mais on aura une augmentation beaucoup plus spectaculaire de la mortalité liée aux températures chaudes en été, qui fera bien plus que compenser la diminution de la mortalité hivernale (Fig. 8.14). Globalement, la mortalité aux températures extrêmes, dans notre pays comme dans d'autres pays du sud de l'Europe, risque d'augmenter considérablement dans l'hypothèse d'un changement climatique et en l'absence de mesures d'adaptation sociétale forte.



**Figure 8.14 :** Évolution de la mortalité prédite pour 63 villes de l'Europe du Sud de 2010 à 2090. Les prédictions sont issues de trois modèles climatiques différents : RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5. Les barres en rose correspondent à l'augmentation de la mortalité associée aux températures plus chaudes en été, celles en bleu correspondent à la diminution de la mortalité associée aux températures moins froides en hiver. Les courbes en noir représentent les variations nettes de la mortalité dues au changement de température. Source [8].

L'exercice a été répété dans les différentes régions du globe et démontre que, notamment en Amérique du Sud, en Amérique centrale, en Asie du Sud-Est, la situation est similaire à celle de l'Europe du Sud, avec une augmentation de la mortalité due aux températures extrêmes.

Pour résumer et conclure, la température a un effet certain et bien démontré à court terme sur la mortalité. En modifiant les températures annuelles, le changement climatique va perturber le nombre de décès attribuables à la mortalité chaque année et dans certaines zones, notamment dans les zones tempérées ou les zones relativement chaudes aujourd'hui. Le bilan qu'on peut attendre, si on ne fait rien, est que la mortalité attribuable à la température va avoir tendance à augmenter dans l'hypothèse du changement climatique tel qu'on le décrit pour les prochaines décennies, en tout cas en-dehors des pays actuellement à climat froid.

### 8.4.2. Maladies à transmission vectorielle – C. Tran Kiem

Les maladies à transmission vectorielle sont des maladies infectieuses dont l'agent pathogène responsable est transmis par un organisme intermédiaire que l'on appelle vecteur<sup>74</sup>. Ces maladies sont susceptibles de se propager rapidement et il

74. <https://www.santepubliquefrance.fr/maladies-et-traumatismes/maladies> (voir « maladies à transmission vectorielle » sur le site)

est donc légitime d'analyser l'influence possible du changement climatique sur ce type de maladie dans l'état actuel de nos connaissances.

De nombreuses espèces sont décrites comme porteuses d'agents pathogènes, par exemple certaines espèces de moustiques. Parmi les maladies vectorielles, on trouve notamment le paludisme transmis par le moustique *Anophèle*, le *chikungunya* dont le virus est transmis par les moustiques *Aedes aegypti* et *albopictus* et la maladie de Lyme transmise par les tiques. Dans le cas de la dengue, par exemple, lorsqu'un moustique *Aedes* pique un individu infecté, il peut être contaminé par le virus de la dengue qui se trouve dans le sang de l'individu infecté. Après une période d'incubation de quelques jours, le virus atteint les glandes salivaires du moustique, qui pourra le transmettre à un individu susceptible lors d'un prochain repas sanguin (Fig. 8.15).

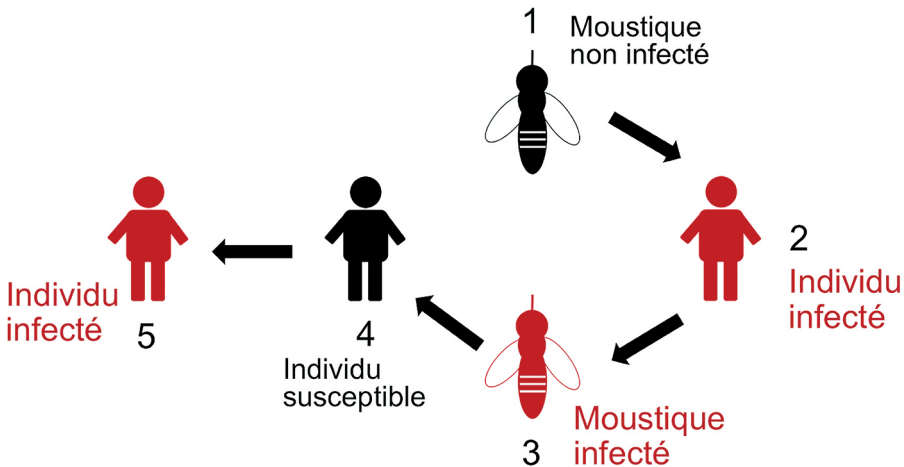
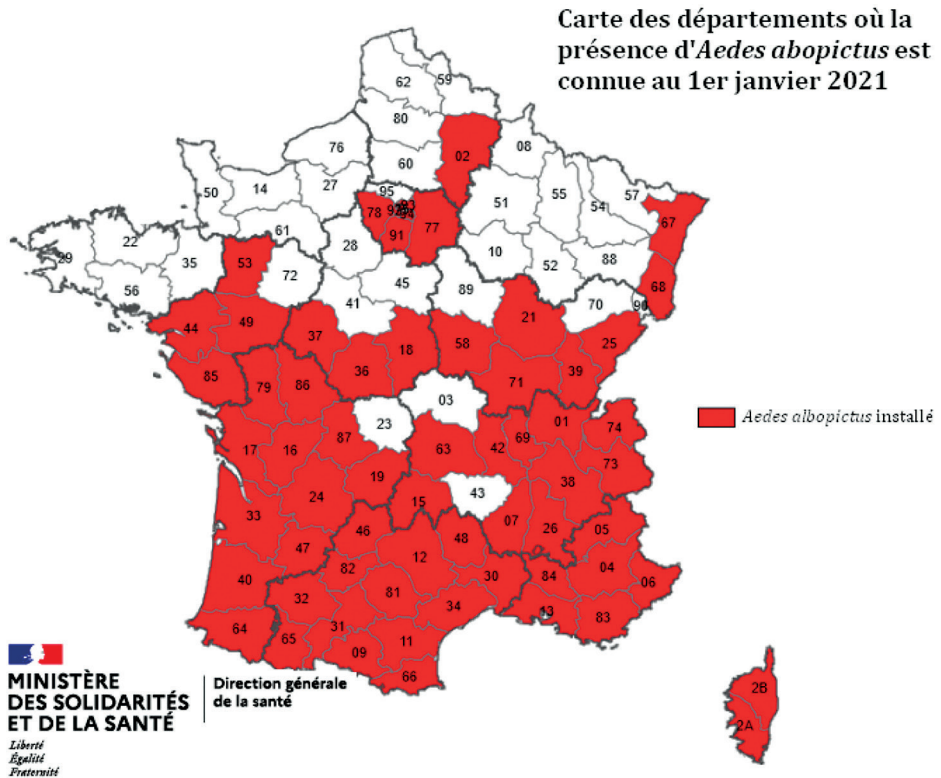


Figure 8.15 : Exemple de cycle de transmission. Source : Cécile Tran Kiem.

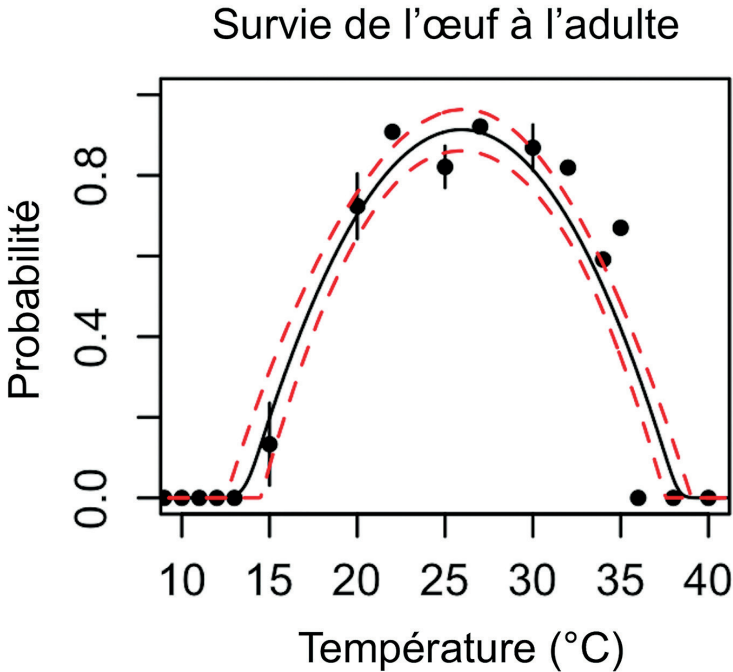
L'Organisation mondiale de la Santé estime que ces maladies représentent plus de 17% du fardeau global des maladies infectieuses et que la moitié de la population mondiale vit dans des zones à risque [9]. L'organisation mondiale de la santé rapporte également que plus de 400 000 décès dus au paludisme sont survenus en 2018 touchant des enfants de moins de 5 ans dans plus de 65% des cas. Le territoire français n'est pas exempt des risques associés aux maladies à transmission vectorielle. La maladie de Lyme, transmise par les tiques, a été à l'origine de plus de 65 000 cas rapportés en 2018. Les moustiques *Aedes* sont régulièrement à l'origine d'épidémies de dengue ou de *chikungunya* dans les territoires d'Outre-Mer. Enfin, le moustique tigre *Aedes albopictus* a été détecté pour la première fois en 1999 en France métropolitaine et a colonisé la majorité des départements de France métropolitaine (Fig. 8.16).



**Figure 8.16 :** Départements où la présence du moustique tigre *Aedes albopictus* est connue (1<sup>er</sup> janvier 2021). Source : ministère de la Santé et des Solidarités<sup>75</sup>.

Un grand nombre de facteurs peut influencer la distribution des maladies à transmission vectorielle. Ainsi les modifications des pratiques agricoles, les changements démographiques ou encore la mobilité humaine sont des facteurs susceptibles de jouer un rôle dans l'émergence ou la réémergence de pathogènes. Le **climat** représente également l'un des nombreux déterminants de la distribution de ces maladies. Le graphe de la **figure 8.17** représente les résultats d'une étude qui a cherché à quantifier la relation entre la température et certains traits de vie des moustiques *Aedes* [10] (on appelle traits de vie d'une **espèce** des caractéristiques liées à tous les organismes de cette **espèce**). Au-dessous de 13 °C et au-dessus de 38 °C, on observe que la probabilité de survie est estimée nulle. Ces températures ne sont donc pas propices au développement de cette **espèce** ni à la transmission des maladies qu'elles propagent.

75. <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>



**Figure 8.17:** Probabilité de survie des larves de moustiques *Aedes* en fonction de la température. Source : E.A. Moredecai *et al.* [10].

D'autres variables environnementales telles que l'humidité ou le niveau de précipitation jouent également un rôle dans la transmission des maladies à transmission vectorielle, mais ces relations sont complexes et non linéaires. Par exemple, d'une part, un environnement trop sec ne permet pas le stade de développement aquatique de certains moustiques mais d'autre part, un fort niveau de précipitation est susceptible d'éliminer les gîtes larvaires. Différentes études se sont penchées sur les effets du changement climatique sur la transmission des maladies vectorielles. Celles-ci ont mis en évidence des relations complexes spécifiques à l'agent pathogène, à l'[espèce](#) vectrice mais également aux régions concernées [11, 12].

Pour conclure, les effets du changement climatique sur les maladies à transmission vectorielle sont complexes et impliquent de nombreux déterminants dont la compréhension demeure encore partielle. Le changement climatique est susceptible de modifier la distribution des maladies à transmission vectorielle et d'entraîner une augmentation de l'incidence de ces maladies dans des zones aujourd'hui plus tempérées. Il est donc encore nécessaire d'en mieux comprendre les mécanismes afin de mieux évaluer les risques associés au changement climatique sur la santé humaine.

## Références

- [1] G. Ouzeau, M. Déqué, M. Jouini, S. Planton, R. Vautard, M. Vrac. 2014. *Le climat de la France au XX<sup>e</sup> siècle*. Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie.
- [2] J.E. Dore, R. Lukas, D.W. Sadler, M.J. Church, D.M. Karl. 2009. Physical and biogeochemical modulation of ocean acidification in the central North Pacific. *PNAS* **106**(30), 123235-12240.  
<https://www.pnas.org/content/pnas/106/30/12235.full.pdf>.
- [3] T. Li, R.M. Horton, Patrick, L. Kinney. 2013. Projections of seasonal patterns in temperature-related deaths for Manhattan, New York. *Nature Climate Change* **3**, 717-721.
- [4] A. Gasparrini, Y. Guo, M. Hashizume, P.L. Kinney, E.P. Petkova, E. Lavigne, ... B.G. Armstrong. 2016B. Temporal Variation in Heat-Mortality Associations: A Multicountry Study. *Environ Health Perspect*, **123**(11), 1200-1207. doi: 10.1289/ehp.1409070 (2015B). Lien: <https://ehp.niehs.nih.gov/doi/full/10.1289/ehp.1409070>.
- [5] A. Gasparrini, B. Armstrong, S. Kovats, P. Wilkinson. 2012. The effect of high temperatures on cause-specific mortality in England and Wales. *Occup Environ Med* **69**: 56-61. Lien: [http://www.ag-myresearch.com/uploads/1/3/8/6/13864925/2015\\_gasparrini\\_ehp.pdf](http://www.ag-myresearch.com/uploads/1/3/8/6/13864925/2015_gasparrini_ehp.pdf).
- [6] M. Burke, F. González, P. Baylis, S. Heft-Neal, C. Baysan, S. Basu, S. Hsiang. 2018. Higher temperatures increase suicide rates in the United States and Mexico. *Nature Climate Change* **8**, 723-729.
- [7] N. Watts, M. Amann, ..., A. Costello. 2018. The 2018 report of the Lancet Countdown on health and climate change: shaping the health of nations for centuries to come. *Lancet* **392**, 2479-2514.  
[https://www.thelancet.com/journals/lancet/article/PIIS0140-6736\(18\)32594-7/fulltext?utm\\_source=kitchenertoday.com&utm\\_campaign=kitchenertoday.com&utm\\_medium=referral](https://www.thelancet.com/journals/lancet/article/PIIS0140-6736(18)32594-7/fulltext?utm_source=kitchenertoday.com&utm_campaign=kitchenertoday.com&utm_medium=referral).
- [8] A. Gasparrini, Y. Guo, F. Sera, A.M. Vicedo-Cabrera, V Huber, S. Tong, *et al.* 2017. Projections of temperature-related excess mortality under climate change scenarios. *The Lancet* **1**(9), E360-E367. DOI: [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(17\)30156-0](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(17)30156-0).
- [9] D. Campbell-Lendrum, L. Manga, M. Bagayoko, J. Sommerfeld. 2015. Climate change and vector-borne diseases: what are the implications for public health research and policy? *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci* **370**. Voir aussi: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/vector-borne-diseases>.
- [10] E.A. Mordecai, J.M. Cohen, M.V. Evans, P. Gudapati, L.R. Johnson, C.A. Lippi, K. Miazgowicz, C.C. Murdock, J.R. Rohr, S.J. Ryan, *et al.* 2017. Detecting the impact of temperature on transmission of Zika, dengue, and chikungunya using mechanistic models. *PLOS Neglected Tropical Diseases* **11**, e0005568.
- [11] D. Roiz, S. Ruiz, R. Soriguer, J. Figuerola. 2014. Climatic effects on mosquito abundance in Mediterranean wetlands. *Parasites & Vectors* **7**, 333.
- [12] M.E.J. Woolhouse, S. Gowtage-Sequeria. 2005. Host range and emerging and reemerging pathogens. *Emerg Infect Dis* **11**, 1842-1847.