



**GIS Climat-Environnement-Société**



# **Changement climatique et santé**

**Actes de la conférence  
internationale**

**Paris-Meudon  
2 et 3 octobre 2014**



Illustrations de la couverture :

En haut :

Étang de Thau - parcs à huîtres.

© Ylliab Photo / Flickr

En bas :

Arrivée d'un courant de densité « tracé » par les particules du sol qu'il soulève au fur et à mesure de sa progression, à Hombori au Mali. Ce phénomène, de nature convective, porte le nom de *haboob*. Photo prise pendant la campagne AMMA (Analyses multidisciplinaires de la mousson africaine).

© CNRS Photothèque / Françoise GUICHARD, Laurent KERGOAT

# Changement climatique et santé

Actes de la conférence internationale des 2 et 3 octobre 2014

The poster features a vertical column of seven circular images on the left: a blue sky, a bright sun, a landscape with a large dome, a forest fire, a pinkish-purple abstract pattern, a cityscape, and a close-up of a mosquito. The main text is centered and reads: **INTERNATIONAL CONFERENCE** (October 2 and 3 (morning)) **Climate change and health & INTERNATIONAL WORKSHOP** (October 3 (afternoon)) **Climate change, health and infectious diseases: towards an ecosystem approach**. A calendar icon shows the dates October 2 & 3, 2014. The location is Espace Isadora Duncan, CNRS campus, Paris-Meudon. A box at the bottom right says: **More information and free registration on [www.gisclimat.fr](http://www.gisclimat.fr)**. The top right logo is CLIMAT ENVIRONNEMENT SOCIÉTÉ, Groupement d'intérêt scientifique. The bottom of the poster displays logos for CNRS, cea, UPMC, UNIVERSITÉ DE VERSAILLES, and several other partner organizations.

## ORGANISATION DE LA CONFÉRENCE

Groupement d'intérêt scientifique Climat-Environnement-Société

## PUBLICATION SOUS LA DIRECTION DE

Sylvie Joussaume  
Serge Morand  
Chantal Pacteau

## RÉDACTION

Laurent Hutinet

## CONCEPTION GRAPHIQUE ET TRAVAIL ÉDITORIAL

Clotilde Péan

# Préambule

Stress thermiques, problèmes respiratoires, allergies, infections bactériennes et/ou virales, cancers de la peau... multiples sont les pathologies susceptibles d'évoluer ou d'émerger avec le changement climatique dans leur répartition spatiale et temporelle, leur incidence et leur intensité. Ces pathologies peuvent résulter de la conjonction de phénomènes climatiques avec d'autres facteurs, qui mettent l'organisme dans une situation transitoire ou permanente de vulnérabilité. Il peut s'agir de l'influence directe de facteurs climatiques sur l'organisme humain qui, lors d'épisodes extrêmes, comme les vagues de chaleur, peuvent avoir des conséquences tragiques comme l'a illustré la canicule de 2003 en Europe. Mais les menaces sanitaires sont aussi souvent liées aux modifications des milieux : dégradations de la qualité de l'air (pollutions atmosphériques, pollens...), modification de la biodiversité et de l'usage des terres, conditions écologiques favorisant la survie et la multiplication de micro-organismes pathogènes, ou des vecteurs de ces micro-organismes susceptibles de transmettre des maladies infectieuses ou parasitaires variées. Ces modifications des milieux sont également elles-mêmes soumises aux effets du changement climatique, créant ainsi un impact indirect du climat sur la santé via les modifications des milieux. Le troisième type d'effets, également qualifiés d'indirects, est lié aux dégradations sociales et économiques des sociétés, avec par exemple la diminution de la qualité des systèmes de santé ou les phénomènes migratoires massifs. Dans tous les cas, appréhender la relation climat-santé nécessite une démarche intégrant différentes disciplines.

L'objectif de la conférence « Changement climatique et santé », organisée les 2 et 3 octobre 2014 par le GIS Climat-Environnement-Société avec l'appui de Serge Morand (Institut des sciences de l'évolution de Montpellier), était d'aborder ces différents aspects à travers des interventions théoriques, méthodologiques et programmatiques. Les projets menés dans le cadre du GIS Climat ont été présentés, accompagnés d'interventions de scientifiques extérieurs à la communauté GIS Climat. Une table-ronde, consacrée à la question « Comment se préparer ? » s'est interrogée sur le croisement des systèmes de mesure environnementales et sanitaires ainsi que sur les systèmes d'alerte, leur construction ou leur amélioration. Les façons multiples d'utiliser concrètement les travaux scientifiques disponibles ont été également débattues.

Cette publication rassemble les synthèses des présentations données au cours de ce colloque qui a permis de disposer d'une vision large de la problématique « Changement climatique et santé ». Tous les supports et enregistrements de cette conférence sont disponibles sur le site du GIS Climat dans la rubrique « Bilan des manifestations passées » (<http://www.gisclimat.fr/bilan-de-la-conférence-internationale-changement-climatique-et-santé>).

Sylvie Joussaume  
Directrice du GIS Climat-Environnement-Société



Arrivée d'un courant de densité « tracé » par les particules du sol qu'il soulève au fur et à mesure de sa progression, à Hombori au Mali. Ce phénomène, de nature convective, porte le nom de haboob. Photo prise pendant la campagne AMMA (Analyses Multidisciplinaires de la Mousson Africaine).  
© CNRS Photothèque / Françoise GUICHARD, Laurent KERGOAT

# Sommaire

<b>Préambule</b> .....	4
Sylvie Joussaume	
<b>Le Groupement d'intérêt scientifique Climat-Environnement-Société, c'est...</b> .....	6
<b>Changement climatique et santé : en a-t-on trop dit ou pas assez ?</b> .....	8
Jean-François Guégan	
<b>Modéliser l'impact du réchauffement climatique sur les maladies vectorielles</b> .....	10
Cyril Caminade	
<b>Les impacts directs du changement climatique sur la santé</b> .....	13
Changement climatique et extrêmes climatiques .....	14
Robert Vautard	
Changement climatique et risques du rayonnement UV .....	16
Sophie Godin-Beekmann / Emmanuel Mahé / Philippe Saiag	
<b>Impacts du changement climatique sur la santé via la composition de l'atmosphère</b> .....	19
Changement climatique, qualité de l'air et santé .....	20
Patrick Kinney	
Changement climatique, pollens et allergies .....	23
Nicolas Viovy	
Changement climatique, écosystèmes et radioactivité .....	25
Anders Möller	
<b>Changement climatique, santé et maladies infectieuses</b> .....	27
Ecologie de la santé : vers une approche intégrée.....	28
Serge Morand	
Méningites, poussières et climat au Sahel .....	32
Béatrice Marticorena	
Climat et dynamique des Vibrio pathogènes humains : les lagunes méditerranéennes .....	35
Patrick Monfort	
Impacts des facteurs climatiques sur la production des vecteurs du paludisme et stratégies d'adaptation.....	38
Application à la région de Nouna au Burkina-Faso	
Cécile Vignolles	
<b>Changement climatique et santé : comment se préparer ?</b> .....	41
L'exposition aux pollens et les modifications liées au changement climatique : impacts sur la santé .....	42
Samuel Monnier	
Changement climatique et maladies à transmission vectorielle : que peut-on faire ? .....	44
Pietro Ceccato	
Changement climatique et santé : comment se préparer ? .....	46
Synthèse de la table ronde	
<b>Conclusion</b> .....	49
Serge Morand	

# Le Groupement d'intérêt scientifique Climat-Environnement-Société (GIS Climat) c'est...

## Un consortium scientifique

Créé en mars 2007, le GIS Climat-Environnement-Société est un groupement de 17 laboratoires d'Ile-de-France, de disciplines variées, qui a pour vocation d'inciter, soutenir et renforcer des recherches interdisciplinaires relatives au changement climatique et à ses conséquences sur l'environnement et la société.

## Des moyens humains

Le GIS Climat fonctionne grâce à une équipe permanente de trois personnes qui définit les grandes orientations scientifiques, aidée par une responsable de la communication et de l'administration. Le comité d'orientation, constitué d'une dizaine d'experts choisis au sein des laboratoires partenaires, accompagne et conseille toutes les décisions scientifiques. Le conseil de groupement, où siègent les représentants des membres fondateurs et des ministères, se prononce sur les orientations stratégiques du consortium. Quant au conseil scientifique, formé d'experts reconnus internationalement, il exprime son avis et formule des recommandations sur les travaux effectués et les orientations proposées.

## Une équipe permanente

Directrice :  
Sylvie Joussaume  
Sylvie.Joussaume@gisclimat.fr

Directeur adjoint :  
Robert Vautard  
Robert.Vautard@gisclimat.fr

Directrice adjointe à l'interdisciplinarité :  
Chantal Pacteau  
Chantal.Pacteau@gisclimat.fr

Responsable communication et administration : Clotilde Péan  
Clotilde.Pean@gisclimat.fr



## Des moyens financiers

Le consortium bénéficie d'une dotation de huit millions d'euros sur une période de neuf ans (2007-2016), apportée par ses six membres fondateurs :

- le Centre national de la recherche scientifique (CNRS) 
- le Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA) 
- l'Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines 
- l'École polytechnique 
- l'Université Pierre et Marie Curie 
- l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME) 
- avec le soutien des ministères en charge de la recherche et de l'environnement.  

## 17 laboratoires partenaires

### Climat



7 laboratoires fédérés dans l'Institut Pierre Simon Laplace (IPSL)



le Laboratoire atmosphères, milieux, observations spatiales (LATMOS)



le Laboratoire inter-universitaire des systèmes atmosphériques (LISA)



le Laboratoire de météorologie dynamique (LMD)



le Laboratoire d'océanographie et du climat : expérimentation et approches numériques (LOCEAN)



le Laboratoire de physique moléculaire pour l'atmosphère et l'astrophysique (LPMAA)



le Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (LSCE)



le laboratoire Milieux environnementaux, transferts et interactions dans les hydrosystèmes et les sols (METIS)

### Santé



les laboratoires de l'UFR médicale Paris Île-de-France Ouest (PIFO)

### Écologie

l'Institut d'écologie et des sciences de l'environnement de Paris (iEES Paris)



le laboratoire d'Écologie, systématique et évolution (ESE)



### Sciences humaines et sociales

le Centre Alexandre Koyré



le Centre d'études sur la mondialisation, les conflits, les territoires et les vulnérabilités (CEMOTEV)



le Centre international de recherche sur l'environnement et le développement (CIRED)



le centre de Recherches en économie-écologie, éco-innovation et ingénierie du développement soutenable (REEDS)



le Laboratoire dynamiques sociales et recomposition des espaces (LADYSS)



le Pôle de recherche en économie et gestion de l'École polytechnique (PREG)



le laboratoire Cultures, Environnements, Arctique, Représentations, Climat (CEARC)



31 projets financés, plus de 20 conférences, séminaires ou colloques organisés.  
Plus de 100 articles publiés.

## Cinq thématiques



Climat global, politiques énergétiques et développement économique



Extrêmes climatiques et régions vulnérables



Changement climatique, écosystèmes, usage des sols et ressource en eau



Impacts du changement climatique sur la santé



Adaptation au changement climatique

Un site internet  
[www.gisclimat.fr](http://www.gisclimat.fr)

# Changement climatique et santé : en a-t-on trop dit ou pas assez ?

Jean-François Guégan

Institut de recherche pour le développement (IRD), UMR Maladies infectieuses et vecteurs, écologie, génétique, évolution et contrôle (MiVEGEC), co-responsable du rapport *Les effets qualitatifs du changement climatique sur la santé en France* (2008)

Alors que le climat n'est qu'une des composantes de la niche écologique des espèces, une conception linéaire des impacts du changement climatique sur la santé a longtemps prévalu. De 1985 à 1995, cette vision alimente de multiples recherches sur les impacts négatifs du changement climatique : elle suscite, par exemple, la publication de cartes de risque global du paludisme ou de la dengue, s'appuyant sur la température et la pluviométrie comme *seuls* paramètres. Puis, entre 1995 et 2005, les chercheurs commencent à s'intéresser aux rétroactions et aux problèmes d'adaptation au contexte du changement climatique. Ce sera le point de départ des questions sur ses véritables effets sur la santé. Depuis 2005, les conceptions se sont enrichies. Le changement climatique est désormais considéré comme l'un des multiples paramètres du changement global. Dans l'article publié par M.E. Woolhouse et S. Gowtage-Sequeria<sup>1</sup> (2005) portant sur cent soixante-dix-sept agents infectieux apparus depuis plus de trente ans et sur les facteurs ayant entraîné leur émergence ou leur résurgence, le premier facteur identifié est le changement d'usage des sols. Le changement climatique, quant à lui, n'apparaît qu'au dixième rang. Son influence est notamment reconnue importante sur le paludisme (Afrique de l'Est), la dengue (Asie du Sud-Est) et la leishmaniose (Europe du Sud). Cependant, les chaînes causales (facteurs proximaux versus facteurs distaux) à analyser sont complexes et restent encore à être explorés.

Certaines chaînes causales peuvent paraître simples : le virus de la poliomyélite, par exemple, présente un optimum de réplication à 37° C et son développement est favorisé par la hausse de la température. Autre exemple : la durée d'incubation intrinsèque du virus de la dengue passe de douze à sept jours quand la température passe de 30° C à 35 °C. Pour autant, les connaissances sur la physiologie des interactions avec son vecteur (*Aedes*

## Le cas du *Vibrio cholerae*

La bactérie *Vibrio cholerae* vit en commensalisme ou en symbiose avec des microcrustacés marins côtiers. Par un effet de cascade, commandé notamment par des effets bioclimatiques, le bloom planctonique provoqué par la hausse des températures de surface débouche sur l'augmentation de la charge en bactéries, puis sur celle des cas de choléra chez les populations riveraines, par exemple au Bangladesh, en Inde ou au Sénégal. A Calcutta et à Matlab, Guillaume de Magny\* a relevé une corrélation saisonnière entre les cas de choléra et la température de l'eau, la concentration en chlorophylle et la pluviométrie. Ce type d'études, prenant en compte plusieurs paramètres, permet de construire des systèmes d'alerte précoce, comme cela a été mis en place récemment au Bangladesh.

\* Magny et al., "Environmental signatures associated with cholera epidemics", 2008, *PNAS* vol. 105 no. 46, 17676–17681, doi: 10.1073/pnas.0809654105.

*spp.*) sont encore insuffisantes. Les entomologistes médicaux concentrent davantage leurs recherches sur les arthropodes vecteurs que sur les interactions entre agents infectieux et leurs hôtes. Or, l'étude de ces interactions peut conduire à des résultats contre-intuitifs. En Afrique, le programme Analyses multidisciplinaires de la mousson africaine (AMMA), lancé par des chercheurs français en 2001, s'est efforcé de modéliser la propagation des anophèles à partir des précipitations et des températures. La durée nécessaire au *Plasmodium* pour produire des stades infestants et la durée de survie du vecteur dépendent de la température. Une augmentation de 4 à 5° C, prévisible dans certaines régions induit, notamment, la forte baisse de la durée de la sporogonie, ce qui provoque potentiellement l'impossibilité de reproduction du cycle parasitaire. Une hausse de la température en Afrique peut donc entraîner, à terme, une baisse drastique du nombre de cas de paludisme. Selon des articles récents et d'après des

<sup>1</sup> Traduit dans « Les maladies infectieuses émergentes : état de la situation et perspectives », *La Documentation française*, 2011.





**Figure 1**  
Des marécages, où se concentre la mycobactérie *Mycobacterium ulcerans*, sont plus fréquemment asséchés aujourd'hui en Guyane française suite à des anomalies pluviométriques. Les populations fréquentant ces espaces naturels ouverts sont plus à risque de contracter la mycobactérie, responsable de l'ulcère de Buruli. Cet exemple illustre le rôle du changement climatique sur des écosystèmes naturels et leur fréquentation rendue plus facile ou importante par les populations humaines. © R.Gozlan, IRD 2014.

méta-analyses actuelles<sup>2</sup>, le paludisme a tendance à régresser, et les risques d'un déplacement vers le Nord, en raison du changement climatique, sont faibles. Il en va de même pour la dengue. L'intensité des transports aériens ou, plus encore, la qualité des systèmes de santé, apparaissent comme des facteurs beaucoup plus importants. De la même façon, selon l'article *Climate change cannot explain the upsurge of tick-borne encephalitis in the Baltics* (S. Randolph et al., 2007), la variation des conditions climatiques dans la région de la Baltique peut avoir une influence sur la transmission de certains virus transmis par les tiques. Cependant, le déclin de l'agriculture dans cette région depuis les années 1990 joue un rôle fondamental : le développement subséquent des jachères favorise celui des arthropodes vecteurs de ce type d'agent infectieux.

Il faut donc étudier avec précision les impacts du changement climatique sur les paramètres multiples des niches écologiques des espèces impliquées dans les pathologies pour pouvoir en tirer des conclusions fiables. Publié en 2007 par A. Moffett, N. Shackelford et S. Sarkar, l'article *Malaria in Africa : Vector Species*

*Niche Models and Relative Risk Maps* s'appuie sur dix-neuf variables bioclimatiques et édaphiques et sur six variables écologiques et biologiques pour dresser des cartes de distribution du paludisme. Selon celles-ci, la variable la plus explicative du paludisme demeure la densité humaine, paramètre fondamental en épidémiologie. Alors qu'il était autrefois une maladie rurale en Afrique, le paludisme est devenu une pathologie périurbaine liée au développement de l'agriculture, donc des points d'eau, en périphérie des villes africaines. Les effets sanitaires sont donc souvent causés par des phénomènes externes à la biologie des agents et des vecteurs.

En conclusion, il est nécessaire de revoir l'inférence causale liant changement climatique et maladies infectieuses en enquêtant précisément sur leurs liens directs et indirects dans le cadre de systèmes complexes, en se confrontant aux phénomènes multi-causaux et à la relation entre facteurs proximaux et distaux. Si la causalité climatique est nette pour les agents pathogènes marins libres, le rôle du changement climatique reste difficile à démontrer pour les agents transmis indirectement par des vecteurs et/ou des animaux réservoirs. La complexité des situations réelles implique la nécessité d'une compréhension comparative et, au long terme, s'appuyant sur des études multi-sites. Il faut, enfin, développer la physiologie des interactions, car la physiologie des systèmes infectieux ne se résume pas à la somme de celles de ses éléments (agent, vecteur, environnement, physiologie et populations humaines ou animales)<sup>3</sup>. ■

**Guyane française :  
comment les marécages asséchés  
exposent les habitants**

Jean-François Guégan est impliqué dans deux programmes d'étude de l'ulcère de Buruli, causé par une mycobactérie des systèmes aquatiques tropicaux, qui détruit le derme et l'épiderme des sujets infectés. Les recherches visent à comprendre la dynamique de circulation de la mycobactérie et celle de sa niche écologique, en lien avec la déforestation, l'utilisation des sols et le changement climatique. Un article de 2014\* montre qu'en Guyane française, la fréquentation, par des populations à risque, des marécages plus fréquemment asséchés, expose davantage les habitants à la mycobactérie.

\* A. Morris, R. Gozlan, J.-F. Guégan et leurs collaborateurs, 2014, « Complex temporal climate signals drive the emergence of human water-borne disease », *Emerging Microbes & Infections* 3, e56; doi:10.1038/emi.2014.56.

Published online 6 August 2014

3 Le dossier « Changement climatique et santé », publié en avril 2014 dans *Pour la science* par Jean-François Guégan, Olivier Plantard (INRA) et Laurent Hubert (INRA), présente un ensemble de résultats obtenus et d'axes de recherche proposés dans cette perspective.

# Modéliser l'impact du réchauffement climatique sur les maladies vectorielles

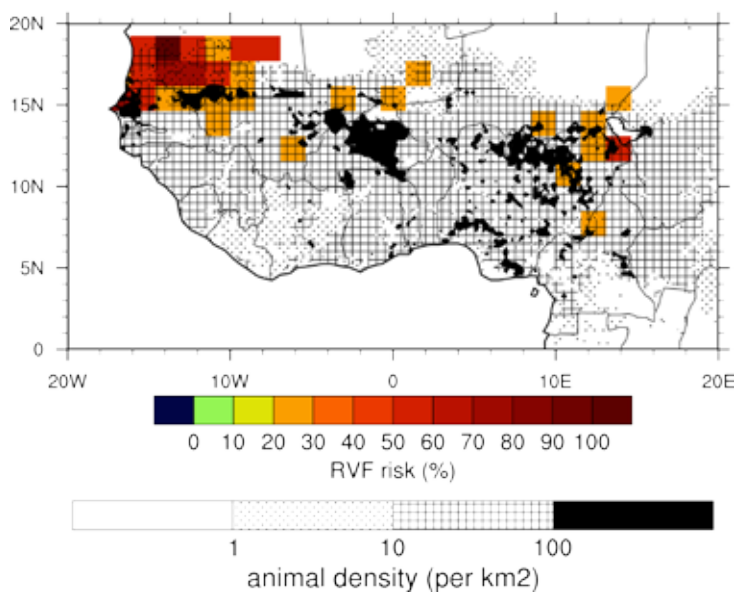
Cyril Caminade

Institute of Infection and Global Health, Université de Liverpool

Le développement d'une maladie vectorielle nécessite la présence de trois éléments : un agent pathogène, un vecteur de transmission et un hôte (humain ou animal). Les systèmes peuvent cependant être plus complexes que ce schéma de base et impliquer des hôtes intermédiaires ou une multiplicité de vecteurs et/ou d'agents pathogènes. Le changement climatique est susceptible d'influer sur ces systèmes de plusieurs façons : les précipitations, par exemple, affectent les gîtes larvaires de nombreux arthropodes et les températures ont une influence importante sur la biologie des vecteurs et des hôtes, ainsi que sur le développement des agents pathogènes à l'intérieur des vecteurs.

Dans le cas de la fièvre de la vallée du Rift (FVR), qui affecte les animaux et l'homme, le virus est transmis par des moustiques des familles *Aedes* et *Culex*. Il apparaît généralement lors d'avortements d'animaux, suite à la manipulation de cadavres et

de fœtus infectés ou à la consommation de viande contaminée. Les conséquences de la maladie peuvent être dramatiques chez l'animal, en particulier pour les petits ruminants, mais la mortalité reste relativement faible chez l'homme. Les travaux de J. A. Ndione<sup>1</sup> ont caractérisé une saison à risque pour le Sénégal. De fortes précipitations, suivant une période sèche en fin de saison des pluies (septembre-octobre), favorisent le développement des moustiques et précèdent généralement les épidémies majeures de FVR dans le nord du Sénégal. Dans le cadre du programme AMMA (Analyse multi-disciplinaire de la mousson africaine), ces résultats ont été extrapolés à l'échelle de l'Afrique de l'Ouest<sup>2</sup> et rapprochés des densités de populations animales afin de modéliser le risque épidémiologique à partir des facteurs climatiques. Cette étude a mis en évidence un risque accru au nord du Sénégal et au sud de la Mauritanie (figure 2), ce qui corrobore les données de terrain des *Centers for Disease Control and Prevention* (CDC), de l'Organisation mondiale de la santé animale (OIE) et de l'Organisation mondiale de la santé (OMS). En Mauritanie, des épidémies majeures de FVR sont survenues en 1998, 2003, 2010 et 2012 : la modélisation a fait ressortir une bonne corrélation avec les forts épisodes pluvieux tardifs constatés durant ces années. En revanche, il reste difficile, malgré la connaissance des données de l'OIE, de connaître les dates exactes des premières infections animales et humaines. Il semble, cependant, que la première infection animale se produise rapidement après la survenue de fortes précipitations en fin de saison des pluies. La transmission à l'homme est cependant difficile à prévoir car de nombreux autres facteurs socio-économiques entrent alors en jeu.



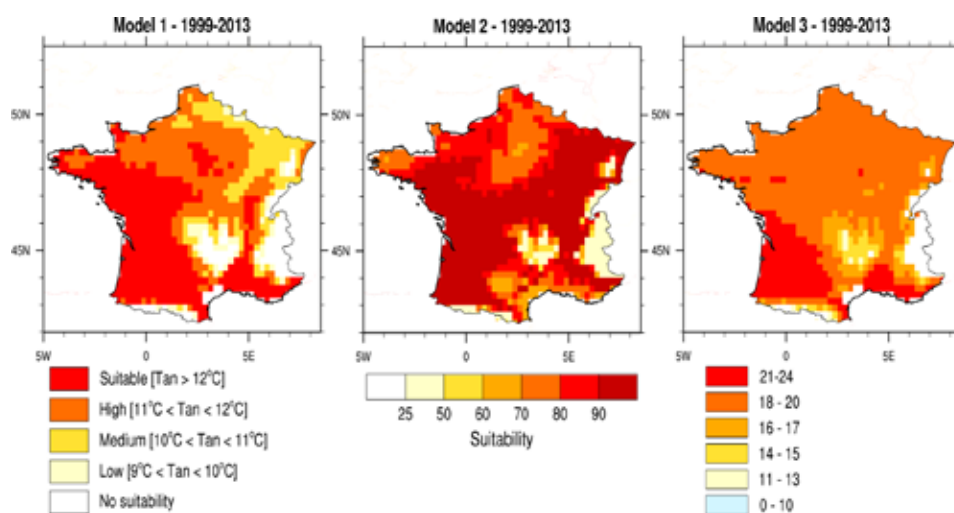
**Figure 2**  
Risque climatique de transmission de la fièvre de la vallée du Rift (couleurs). Les densités animales (ovines et bovines) sont représentées par des niveaux de noir et superposées au risque climatique.  
Pour de plus amples détails voir Caminade et al. 2011.

1 J.A. Ndione et al., 2008, « Variabilité intra-saisonnière de la pluviométrie et émergence de la fièvre de la vallée du rift dans la vallée du fleuve Sénégal: Nouvelles considérations », *Climatologie*, Vol. 5.

2 C. Caminade et al., 2011, « Mapping Rift Valley Fever and Malaria risk over West Africa using climatic indicators », *Atmospheric Science Letters*, Volume 12, pages 96–103.

Le moustique tigre *Aedes albopictus* est l'un des vecteurs principaux de la dengue et du chikungunya. Quelques cas autochtones de dengue ont été rapportés en France en 2010 et en 2014, et une épidémie de chikungunya est survenue en Italie, dans la province de Ravenne, en 2007. Jusqu'ici, l'espèce était surtout présente en Asie du Sud-Est et en Inde, mais elle s'est propagée à partir des années 80-90 en Europe et aux États-Unis, ainsi que dans certaines zones d'Afrique, en raison de la globalisation (notamment du fait du commerce des pneus usagés dans lesquels les insectes pondent leurs œufs, résistants à la sécheresse). A partir de 1990, l'insecte était déjà établi en Italie et en Albanie. Depuis, il s'est propagé sur une large zone s'étendant de la côte est de l'Espagne

conditions d'hivernage (absence de gel en hiver), de la photopériode et de la pluviométrie. Les simulations d'ensemble effectuées pour l'Europe<sup>4</sup> montrent que l'espèce aurait pu s'installer sur la période 1990-2009 au Portugal et en Galice, et que le Benelux et le sud de l'Angleterre deviendraient hospitalières sur la période 2030-2050. D'autres régions deviendraient en revanche trop sèches pour l'accueillir (Sud de l'Espagne, par exemple). Pour autant, ce risque climatique ne se réalisera pas si l'insecte et/ou ses œufs ne sont pas introduits. Les données observées montrent qu'en octobre 2013, l'espèce était implantée dans le sud-est de la France et qu'elle apparaît dans le sud-ouest du pays, ce qui est inquiétant, car les conditions climatiques y sont



**Figure 3** Régions climatiquement hospitalières pour l'établissement du moustique tigre *Aedes albopictus* en France métropolitaine pour trois différents modèles bio-climatiques. Ces résultats sont tous basés sur les données climatiques observées (EOBS). Pour plus de plus amples détails voir Caminade et al., 2012.

jusqu'aux pourtours de l'Adriatique et s'est aussi installé en France métropolitaine. Compte tenu des caractéristiques biologiques de cette espèce, l'hypothèse d'un lien de l'évolution de l'aire de présence de l'insecte avec l'évolution du climat a été proposée par Jolyon Medlock<sup>3</sup>. Il a tenté d'évaluer les zones pour lesquelles les conditions climatiques paraissent favorables à une colonisation pérenne du moustique tigre au Royaume Uni.

Pour évaluer ces zones où le moustique tigre est susceptible de s'installer à partir de modèles bio-climatiques robustes et régionalisés, il faut tenir compte de différents facteurs climatiques, comme les conditions de températures d'été, mais aussi des

plutôt favorables (figure 3). La simulation indique aussi que plusieurs pays tels que les Pays Bas, la Belgique ou l'Allemagne deviendraient favorables au moustique-tigre sur la période 2030-2050, ce qui est déjà corroboré par plusieurs observations. Malgré les précautions prises, certains journalistes tirent de ces résultats des articles à sensation alors que rien n'a été affirmé sur le risque de propagation du virus de la dengue, par exemple. L'étude a été actualisée grâce à trois modèles pour la France sur la période 1999-2013 et a été répliquée pour les États-Unis et le Canada<sup>5</sup>.

<sup>3</sup> Medlock J. M, Avenell D, Barras I, & Leach S, 2006, « Analysis of the potential for survival and seasonal activity of *Aedes albopictus* (Diptera: Culicidae) in the United Kingdom ». *J. Vector Ecol.* 31, 292–304.

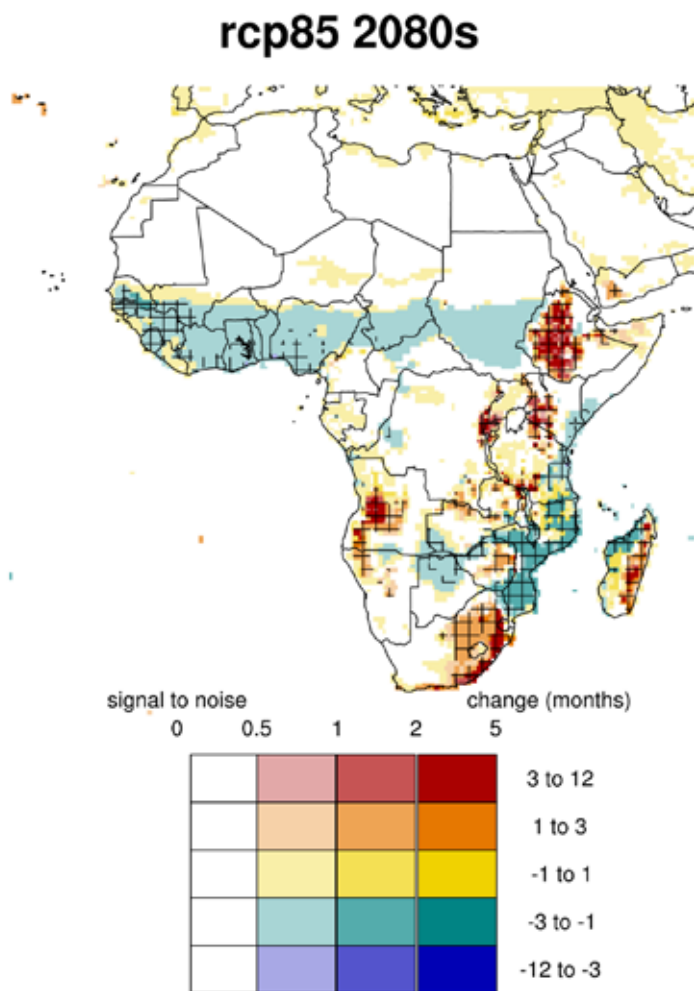
<sup>4</sup> Caminade C. et al., 2012, « Suitability of European climate for the Asian tiger mosquito *Aedes albopictus*: recent trends and future scenarios », *Journal of the Royal Society Interface*, 9(75): 2708-2717.

<sup>5</sup> Ogden N.H. et al., 2014, « Recent and projected future climatic suitability of North America for the Asian tiger mosquito *Aedes albopictus* », *Parasite and Vectors*, 7:532.

En ce qui concerne le paludisme, l'évaluation du risque dépend des modèles et méthodes utilisés. En s'appuyant sur cinq modèles de paludisme, sur cinq modèles de climat et sur une matrice d'évaluation des incertitudes issue du travail du *Met Office*, un article<sup>6</sup> prévoit une hausse des risques dans les zones tropicales d'altitude et une diminution des risques en Afrique de l'Ouest en raison de la hausse des températures aux horizons 2080 (figure 4). Les effets du changement climatique sur la santé sont donc non linéaires,

même s'il faut se garder de prévisions trop hâtives compte tenu des larges incertitudes présentes dans ces scénarios.

Il existe de nombreux exemples du rôle de l'évolution climatique favorisant certaines maladies vectorielles infectieuses, notamment dans les zones de montagne. Le climat fait indéniablement partie des facteurs structurants mais il apparaît généralement au septième ou au huitième rang des facteurs épidémiologiques globaux. L'augmentation de la population mondiale, sa mobilité croissante et la globalisation constituent les facteurs essentiels de l'évolution de ces risques. Dans l'ensemble, les études qui évaluent l'influence du climat sur les agents pathogènes et les vecteurs restent extrêmement simplistes, notamment parce que la biologie des espèces est, en pratique, surtout affectée par la météorologie à des échelles de temps plus rapides (heure, journée). Les simulations doivent donc être considérablement améliorées. Afin d'éviter des erreurs, ces simulations doivent s'appuyer sur des modèles multiples (méthodes d'ensemble), notamment en termes d'évolution climatique et de scénarios démographiques. Il faut aussi rester prudent quant à la fiabilité des modèles déployés actuellement, puisque les conditions climatiques ne sont pas seules en cause dans la propagation des vecteurs et des agents pathogènes. Il faut donc s'appuyer sur la multidisciplinarité pour développer des raisonnements robustes. Enfin, comme le montre notamment une initiative allemande (projet ISI-MIP), l'approche comparative utilisant des ensembles multi-modèles, multi-scénarios du projet CMIP5 du GIEC pourrait jouer un rôle important pour estimer les impacts du réchauffement climatique sur les maladies infectieuses vectorielles mais aussi sur d'autres secteurs importants, comme les ressources en eau et l'agriculture. ■



**Figure 4**  
 Changement futur (en mois) de la durée de la saison de transmission du paludisme tropical (*P. falciparum*), basé sur cinq différents modèles de paludisme et cinq différents modèles de climat (scénario d'émission extrême RCP 8.5 ; les changements étant calculés entre les périodes 2069-2099 et 1980-2010 ; la moyenne d'ensemble est représentée). Les incertitudes d'ensemble sont représentées par différents niveaux de transparence.  
 Pour plus de plus amples détails voir Caminade et al., 2014.

6 C. Caminade et al., 2014, « Impact of climate change on global malaria distribution », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(9): 3286-3291.

*Les impacts directs  
du changement  
climatique  
sur la santé*



# Changement climatique et extrêmes climatiques

Robert Vautard

CNRS, Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (LSCE)

Les conséquences des vagues de chaleur sur la santé sont bien connues et les effets de l'hyperthermie et de la déshydratation sont étudiés par de nombreux instituts. Partout dans le monde, des excès de mortalité sont constatés en cas de vague de chaleur, même si les températures « de confort », pour lesquelles la mortalité est minimale, varient selon les régions. Selon une nouvelle étude réalisée avec Patrick Kinney, dans le cadre du GIS Climat, et qui porte sur les excès de mortalité mensuels par rapport à la normale à Paris et à New-York, l'effet des températures extrêmes est marqué en été, mais bien moins en hiver. En effet, la relation entre froid et surmortalité est plus délicate à mettre en avant, notamment du fait de la difficulté à distinguer l'effet du froid de celui des pathologies hivernales telles que la grippe. Autre difficulté : les décès liés aux vagues de froid sont différés dans le temps.

Concernant les inondations et les tempêtes, l'évaluation de leurs effets sur la mortalité demeure, là encore, très qualitative. On notera cependant un focus récent sur leurs conséquences sur la santé mentale des victimes, sujet longtemps ignoré. En effet, les traumatismes engendrés par de tels événements ne sont pas que physiques mais aussi psychologiques.

## Qu'appelle-t-on

### impacts directs du changement climatique ?

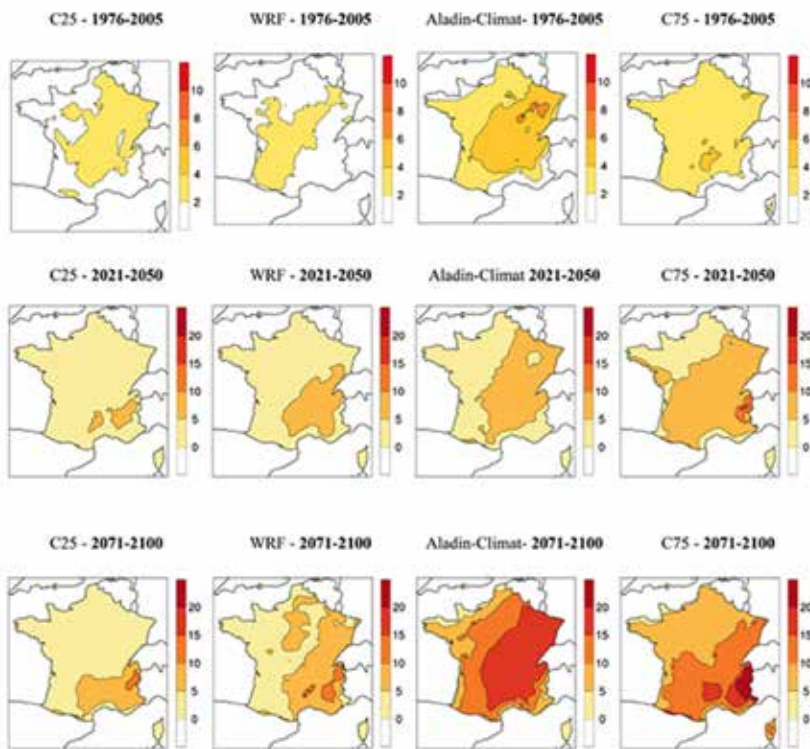
Tels que définis dans le chapitre 11 du rapport du groupe 2 du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), les impacts directs du changement climatique sont liés aux événements extrêmes (températures, inondations, tempêtes) et au rayonnement solaire. Malgré quelques études nationales quantitatives, l'approche actuelle demeure essentiellement qualitative et n'est pas, pour le moment, en mesure de proposer des prévisions assorties de marges d'incertitude. La question des extrêmes climatiques va devenir une question centrale pour l'étude des relations entre changement climatique et santé.

Mais quelle est la part du changement climatique dans ces événements extrêmes et dans l'évolution de leurs impacts ? La question est difficile et le GIEC reste assez prudent en la matière. On constate que la recherche est plus avancée sur les méthodes permettant de déterminer la part du changement climatique dans les événements extrêmes. En revanche, les méthodes de quantification concernant la part du changement climatique dans l'évolution des impacts des événements actuels sont encore très récentes et nécessitent de réunir une communauté nouvelle de climatologues, de statisticiens et de spécialistes de la santé publique.

Malgré le ralentissement actuel du réchauffement global, le nombre de vagues de chaleur continentales continue d'augmenter<sup>1</sup>. Cependant, évaluer la part du changement global dans chaque événement extrême est très difficile, car les événements climatiques sont naturellement très variables. L'approche la plus rigoureuse consiste à savoir si la modification de la composition de l'atmosphère affecte la fréquence de ces événements, donc leurs impacts. Pour cela, les équipes d'Oxford ont comparé la probabilité d'occurrence de certains événements à partir de simulations du climat actuel et de simulations du climat de périodes passées, en utilisant des modèles atmosphériques<sup>2</sup>. Ils ont permis de montrer que le temps de retour d'un événement comme celui de la canicule russe de 2010 était plus court pour la période actuelle que pour la période pré-industrielle. Il a aussi été démontré que les canicules de 2003 et de 2010 auraient été très improbables sans changement climatique. Ce type d'évaluation est beaucoup plus difficile à mener pour les précipitations et pour le débit des rivières, puisque les marges d'incertitude sont plus élevées.

1 Sonia I. Seneviratne et al., « No pause in the increase of hot temperature extremes », *Nature Climate Change* 4, 161–163, 2014.

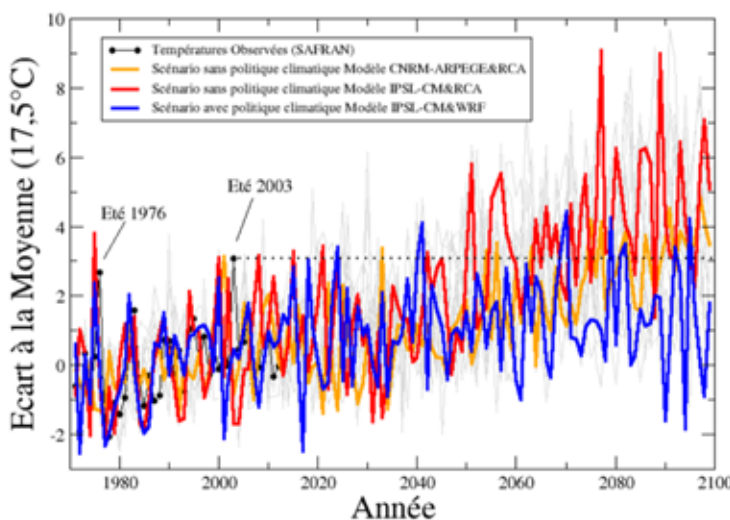
2 Christidis, N., Stott, P. A., Jones, G. S., Shiogama, H., Nozawa, T., & Luterbacher, J., 2012, « Human activity and anomalously warm seasons in Europe », *International Journal of Climatology*, 32(2), 225-239.



**Figure 5**  
 Nombre de jours de vagues de chaleur, en été, pour la période de référence 1976-2005 (ligne du haut) et les écarts à cette référence pour le scénario RCP4.5 aux horizons 2021-2050 (ligne du milieu) et 2071-2100 (ligne du bas). Pour chaque ligne, de gauche à droite : 25<sup>e</sup> centile de l'ensemble, WRF, Aladin-Climat, 75<sup>e</sup> centile de l'ensemble.  
*Le climat de la France au XXI<sup>ème</sup> siècle*, Volume 4, scénarios régionalisés : édition 2014 pour la métropole et les régions d'outre mer.

Concernant la contribution anthropique à la probabilité des événements extrêmes, évaluée par le groupe 1 du GIEC, les taux de probabilité obtenus ne permettent de conclure positivement que pour l'augmentation du nombre de vagues de chaleur. En effet, pour les cyclones et les sécheresses, le niveau de confiance reste faible. Selon certaines études, le niveau de confiance du lien causal entre changement global et précipitations extrêmes est cependant un peu plus élevé.

Selon les simulations des modèles à basse et à haute résolution réalisées actuellement, les vagues de chaleur devraient se multiplier à l'avenir. En l'absence de politique climatique, les écarts de température par rapport à la normale ne seraient plus de l'ordre de 3 °C pour les étés les plus chauds (ce qui a été le cas en 1976 et en 2003 en France), mais pourraient atteindre environ 9 °C autour de 2080. Les modèles indiquent que les écarts pourraient être très marqués d'un été à l'autre : les systèmes de santé doivent alors être capables, sous une échéance peu lointaine, de faire face à des vagues de chaleur à 42 °C durant quinze jours consécutifs à Paris. Les modèles disponibles prévoient aussi une hausse des événements de fortes précipitations en Europe et donc en France. Les résultats disponibles permettent de prédire un décalage des zones les plus touchées par les tempêtes vers le nord, mais pas de conclure en termes de gravité ou de fréquence.



**Figure 6**  
 Écarts à la moyenne (1971-2005) de la température moyenne de chaque été sur le Nord de la France, observés et simulés par plusieurs modèles climatiques et pour plusieurs scénarios économiques.  
 Source : simulation des projets CMIP5 et EURO-CORDEX.

Malgré quelques études pionnières, les impacts des événements extrêmes liés au changement climatique demeurent donc très difficiles à quantifier. La science de l'attribution des impacts des événements extrêmes au changement climatique global émerge, quant à elle, à peine et nécessitera un important travail interdisciplinaire. Quelques travaux commencent néanmoins à être menés en ce sens. ■

# Changement climatique et risques du rayonnement UV

Sophie Godin-Beekmann

CNRS, directrice de l'Observatoire Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines (OVSQ)

Philippe Saïag

Chef de service de dermatologie générale et oncologique, hôpital Ambroise Paré de Boulogne

Emmanuel Mahé

Chef du service Dermatologie, hôpital Victor Dupouy d'Argenteuil

Acronymes :

**RISC UV**

*Impact du changement  
climatique sur le rayonnement  
ultra-violet*

**EREBUS**

*Évaluation des risques et bénéfices de  
l'exposition aux rayonnements ultra-violets*



Porteur : Sophie Godin-Beekmann (LATMOS)

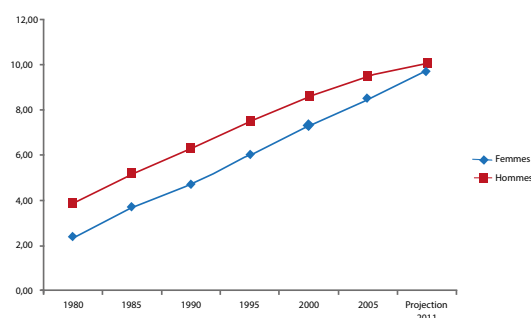
Début : RISC UV : 2008 / EREBUS : 2012

Durée : 24 mois / 12 mois

Labo. GIS : LATMOS, PIFO, IPSL

Labo. Hors GIS : Laboratoire d'optique appliquée (LOA)  
Centre national de recherches  
météorologiques (CNRM)  
Laboratoire de physique et de chimie  
de l'environnement et de l'espace (LPC2E)

*Les projets RISC-UV et EREBUS se sont appuyés sur la collaboration de physiciens de l'atmosphère, de médecins dermatologues et d'épidémiologistes afin d'évaluer les parts relatives des facteurs comportementaux et environnementaux dans l'augmentation observée du nombre de cas de cancers cutanés. Trois colloques RISC-UV pluridisciplinaires ont été organisés dans ce cadre. Le savoir géophysique a été mobilisé pour mieux caractériser les différentes modalités de mesure du rayonnement UV et pour évaluer l'influence des principaux paramètres atmosphériques sur ce rayonnement. Des campagnes de mesure dans différents environnements ont été effectuées pour faire le lien avec les études médicales et pour affiner les messages de prévention. Le projet a aussi porté sur les doses érythémateuses et sur les doses nécessaires à la synthèse de la vitamine D et a simulé leur évolution à partir des modèles climatiques.*



**Figure 7**

Tendance temporelle de l'incidence du mélanome en France (nombre de cas pour 100 000 personnes).

Sources : InVS/INSERM, 2011 (1) ; HCL/InVS/INCa/Francim/Inserm, 2011 (2).

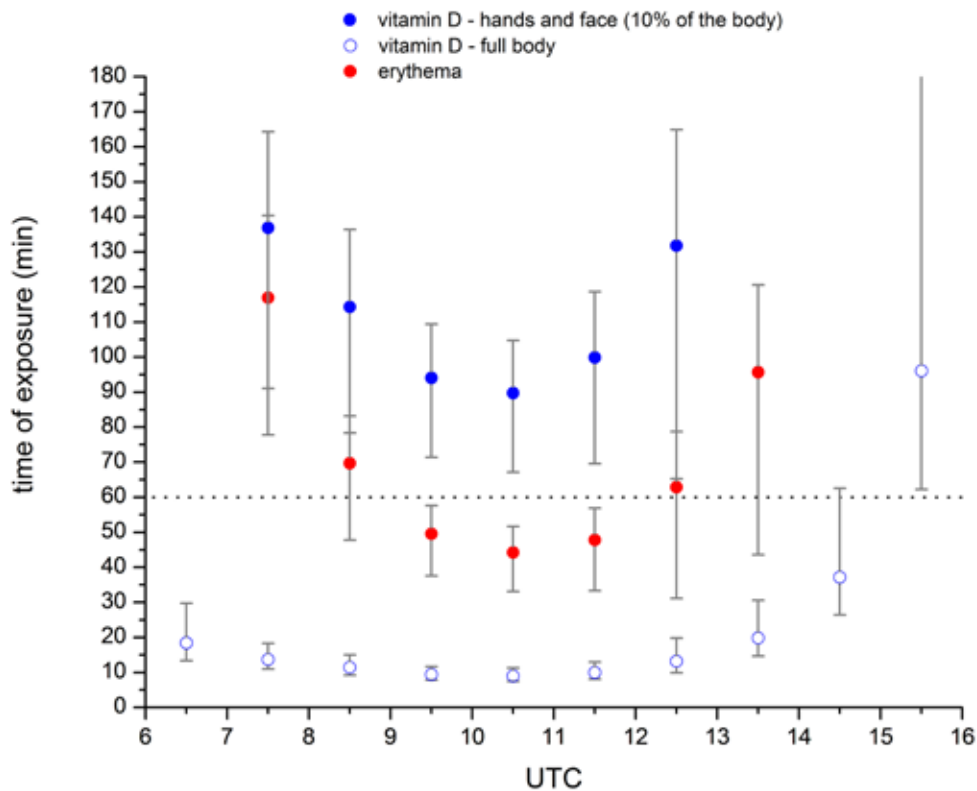
trois pour cent milles environ à dix pour cent milles de 1980 à 2011, le facteur de risque constitutionnel principal étant le phénotype des patients : les sujets à peau claire sont les plus touchés.

Le mélanome n'est pas le seul cancer de la peau, puisque les carcinomes basocellulaires et spinocellulaires sont de loin les plus fréquents. Ainsi, dans le sud des États-Unis, la mortalité liée aux carcinomes spinocellulaires est désormais égale à celle due aux mélanomes. Or, les mélanomes et les carcinomes basocellulaires et spinocellulaires sont liés aux rayonnements ultra-violet (UV), responsables de 90 % du vieillissement de la peau. Les facteurs causaux à évaluer sont donc la quantité d'UV produite, leur transmission dans l'air et les facteurs comportementaux qui déterminent les doses annuelles reçues. Il faut aussi tenir compte de l'allongement de la vie et de l'amélioration du dépistage pour compléter l'évaluation des risques.

Globalement, le nombre de cancers augmente depuis 1975 et la mortalité associée diminue ; mais alors que les taux d'incidence baissent pour des groupes tels que les cancers de la prostate et des poumons chez les hommes, la fréquence du mélanome de la peau a considérablement augmenté pour les deux sexes, au point d'être devenu un problème de santé publique. En France, le nombre de cas est passé de

Le projet RISC-UV a comparé les résultats de plusieurs appareils de mesure installés à Palaiseau. Les mesures effectuées par les radiomètres à bande large, les satellites et les dosimètres personnels ont été comparées à celles de l'instrument de référence – le spectrophotomètre du LOA – en relevant l'influence des paramètres annexes. Les dosimètres individuels en vente dans le commerce se sont révélés peu précis et





**Figure 8**

Temps nécessaire pour synthétiser 1000UI de vitamine D et pour développer un érythème.

Paris sept-oct 2008.

Source : campagne RISC-UV 1.

surévaluent très souvent les doses reçues. Les radiomètres à bande large sont généralement utilisés par les chercheurs, ainsi que les mesures par satellite qui permettent de calculer les indices UV (IUV) publics. A cet égard, le projet a montré que les valeurs relevées par le modèle MOCAGE de Météo France peuvent présenter des biais en cas de couverture nuageuse. Traditionnellement, l'indice UV est corrigé par un facteur de modulation des nuages qui corrige l'indice UV de ciel clair, mais le projet a montré que le rayonnement au sol n'est affecté qu'à partir d'une couverture nuageuse de plus 70 %, certains types de nuages fractionnés pouvant même jouer un rôle amplificateur. En mai et juin 2009, les IUV au sol ont été mesurés en différents lieux de Paris, et il est apparu que l'indice dépendait de l'environnement des sols.

De nombreuses études montrent qu'en hiver, le temps nécessaire pour synthétiser mille unités de vitamine D en Europe tempérée est plus long que la durée suffisante pour provoquer un érythème. Afin d'évaluer comment ces deux durées évolueront en fonction du changement climatique, un modèle radiatif fondé sur les simulations du modèle IPSL-CM5 ESM a été utilisé. Aux hautes et moyennes latitudes de l'hémisphère nord, la reconstitution de la couche d'ozone prévue dans le courant du XXI<sup>ème</sup> siècle

réduira le rayonnement UV à la surface. Cette reconstitution étant influencée par le changement climatique, la réduction du rayonnement UV sera plus ou moins importante suivant les scénarios de changement climatique. Pour tous les scénarios, la réduction du rayonnement UV entraînera une augmentation de la durée d'exposition nécessaire pour la synthèse de la vitamine D. En revanche, pour le risque de coups de soleil, la réponse dépendra du scénario de changement climatique. La durée

#### Les UV

La longueur d'onde des rayonnements UV se répartit entre 100 et 400 nm. Le rayonnement UV reçu à la surface de la Terre est constitué à 98 % par les UVA (315 - 400 nm) et à 2 % par les UVB (280 - 315 nm). Le rayonnement UVB final dépend de l'altitude, de l'angle solaire, de l'épaisseur de la couche d'ozone stratosphérique, des nuages, des aérosols et de l'albédo ou réflectivité de surface. Les spectres d'action pour l'apparition des érythèmes et la synthèse de la vitamine D dépendent des longueurs d'onde. L'indice UV (IUV) correspond à 40 fois la valeur de l'irradiance pondérée par le spectre d'action pour l'érythème. Les incidences sur la santé dépendent des doses cumulées.

d'exposition nécessaire pour développer un coup de soleil (ou érythème) augmentera pour le scénario de plus fort changement climatique (RCP 8.5) alors qu'elle pourra diminuer pour le scénario de moindre changement climatique (RCP 2.6) qui s'accompagne d'une réduction de la quantité d'aérosols dans l'atmosphère.

En termes de prévention, plusieurs études pluridisciplinaires ont été menées par l'équipe du projet RISC-UV qui ont permis un dialogue entre physiciens, dermatologues et spécialistes de santé publique. Les protocoles ont associé mesures physiques, évaluations des risques et études comportementales. Ainsi, la réduction de l'IUV effectif de personnes situées à l'ombre a été mesurée, mettant en évidence que l'ombre (notamment celle des bâtiments) est généralement un très mauvais

photoprotecteur, alors que pourtant, les campagnes de prévention insistent sur son rôle. En outre, une étude sur l'exposition de jeunes footballeurs a permis de préciser la dose reçue par les joueurs, par rapport à la dose érythémateuse minimale (DEM) qui varie en fonction des phototypes : les joueurs à la peau claire dépassent ainsi dix fois la dose en une journée. Une étude a également été conduite dans une école d'Anthony, en région parisienne, et montre que les comportements actuels sont inadaptés, quels que soient les lieux fréquentés par les enfants, ce qui rend nécessaire une politique de prévention beaucoup plus efficace pour tous les phototypes. Selon l'équipe de recherche de RISC-UV, il faut adapter les messages de prévention, qui doivent être équilibrés : il ne s'agit pas d'éviter le soleil, mais les coups de soleil, qui constituent un facteur de risque considérable, notamment durant l'enfance. ■

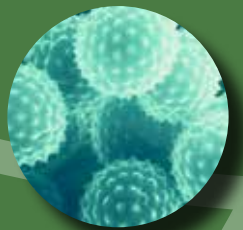


**Figure 9**  
Mesures physiques réalisées dans la cour d'une école.  
Source : campagne RISC-UV 1.



**Figure 10**  
Mesures physiques et comportementales sur de jeunes footballeurs.  
Source : campagne RISC-UV 1.

*Impacts  
du changement  
climatique  
sur la santé  
via la composition  
de l'atmosphère*



# Changement climatique, qualité de l'air et santé

Patrick Kinney

Université de Columbia, directeur du *Columbia Climate and Health Program*.

Acronyme : **ACHIA**  
*Air Pollution Climate Change Health Impact Assessment*

Porteurs : Patrick Kinney (Université de Columbia)  
Didier Hauglustaine (LSCE)

Début : 2011

Durée : 24 mois

Labo. GIS : LSCE, LMD, REEDS

Labo. Hors GIS : Insitut de veille sanitaire (INVS)  
Institut national de l'environnement  
industriel et des risques (INERIS)  
AIRPARIF  
Observatoire régional de santé Île-de-  
France (ORS)  
US Environmental Protection Agency  
(US EPA)  
Université de Columbia

*L'objectif général de ce projet était d'appliquer des modèles de climat, de qualité de l'air et de santé afin d'évaluer les éventuels impacts futurs de l'évolution de l'ozone troposphérique et des particules (PM<sub>2,5</sub>) sur la santé, dans différents scénarios de changement climatique. Cette question a été examinée à trois échelles spatiales : mondiale, régionale (Europe), et en milieu urbain (Paris). Le scénario climatique RCP 4.5 a été retenu.*

Les effets de la pollution de l'air par les particules de type PM<sub>2,5</sub> (d'un diamètre inférieur à 2,5 micromètres) sont très bien documentés, en particulier en ce qui concerne leur contribution au développement de maladies chroniques graves (maladies cardiovasculaires, respiratoires, cancers...) se traduisant par une perte de la qualité de vie et parfois par des décès prématurés. Une étude nord américaine<sup>1</sup> souligne également les effets sur la mortalité d'une exposition à l'ozone sur le long terme. La lutte contre les émissions polluantes constitue donc un enjeu important qui peut, au travers de la réduction de la pollution de l'air, bénéficier à la fois à la lutte contre le changement climatique et à l'amélioration de la santé.

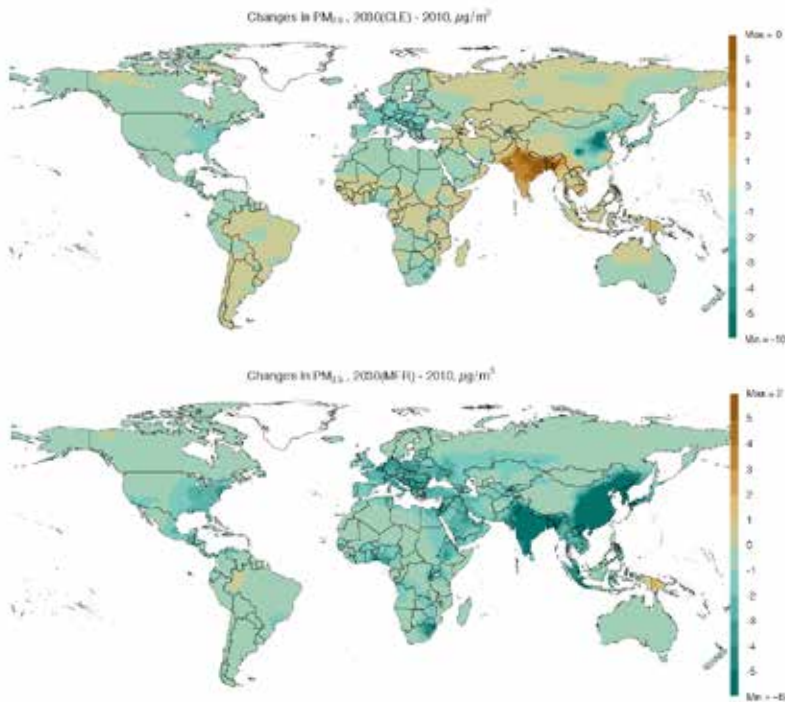
Dans le projet ACHIA, les impacts sanitaires ont été évalués à trois échelles spatiales (mondiale, européenne et Île de France) en prenant en compte deux scénarios d'émission (CLE : *current legislation emission reductions* et MFR : *maximum feasible reductions of future emissions*)<sup>2</sup> et en examinant les modifications de concentration simulées pour les conditions actuelles et futures (RCP 4.5). Les impacts sur la santé ont été modélisés sans tenir compte de l'évolution de la population et en se référant aux taux de mortalité constatés en 2010. Ils ont été calculés aux horizons 2030 et 2050 pour le monde et l'Europe, et 2050 pour l'Île-de-France. Ils prennent en compte la mortalité due aux maladies cardio-vasculaires (MCV) liées aux PM<sub>2,5</sub>, ainsi que la mortalité due aux affections respiratoires liées à la concentration en ozone troposphérique en été.

A l'échelle mondiale, le scénario CLE conduit, en 2030, à une augmentation du nombre de décès pour causes cardiovasculaires liées aux particules fines, avec 6 800 décès additionnels par an dans le monde par rapport à 2010. La majorité de ces décès se produiraient en Asie. En termes de surmortalité liée à l'ozone, ce même scénario prédit une hausse en Chine et en Inde, mais une certaine baisse en Europe et aux États-Unis. Selon le scénario MFR, les baisses de surmortalité seraient beaucoup plus étendues en raison de la baisse des concentrations en PM<sub>2,5</sub>. Elles concerneraient l'Europe, l'Asie centrale ainsi que la majorité de la population de Chine et d'Inde. Pour les effets liés à l'ozone, elles concerneraient la quasi-totalité de l'Asie de l'Est et du Sud-Est, ainsi que les États-Unis, l'Argentine et l'Afrique du Sud.

En ce qui concerne l'Europe, les deux scénarios CLE et MFR prédisent, pour 2030, une baisse des impacts liés aux deux types de pollutions considérés. En 2010, plus de deux cent cinquante mil-

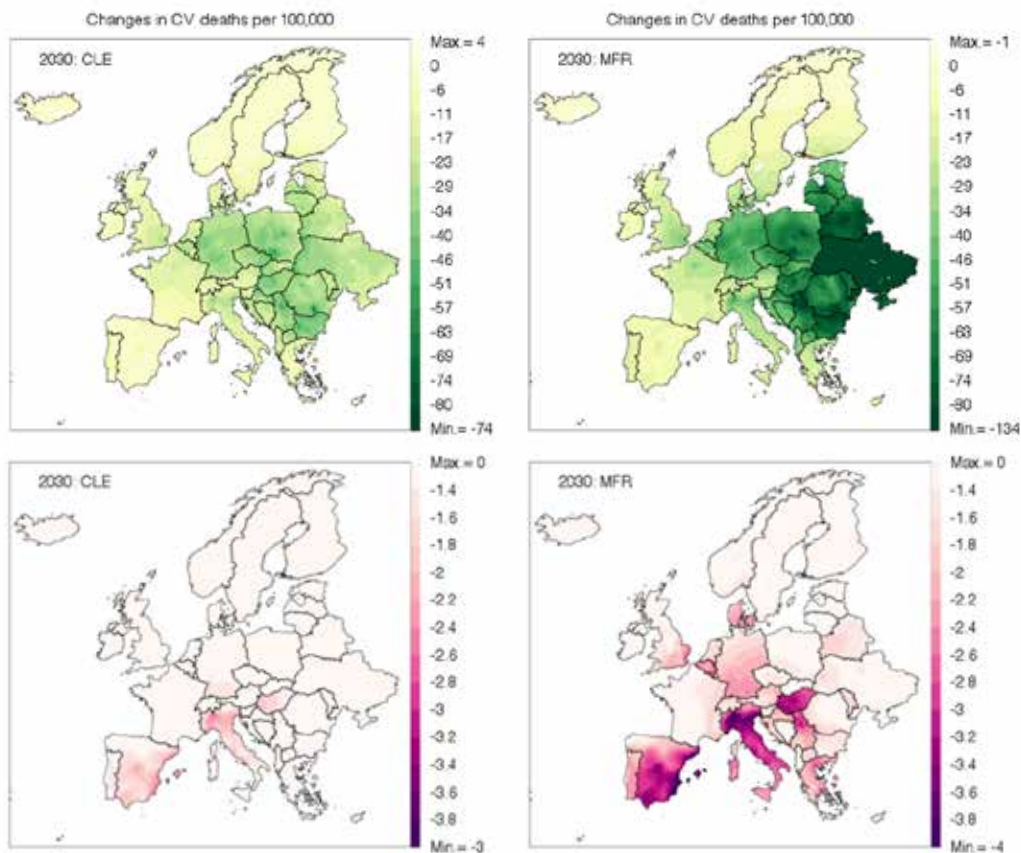
<sup>1</sup> M.Jerrett et al., « Long-Term Ozone Exposure and Mortality », *N Engl J Med* 2009 ; 360:1085-95.

<sup>2</sup> Le scénario CLE se fonde sur la baisse des émissions prévisibles compte tenu de la réglementation actuelle, pays par pays. Le scénario MFR se base sur les plus fortes réductions réalisables en déployant toutes les technologies actuellement disponibles.

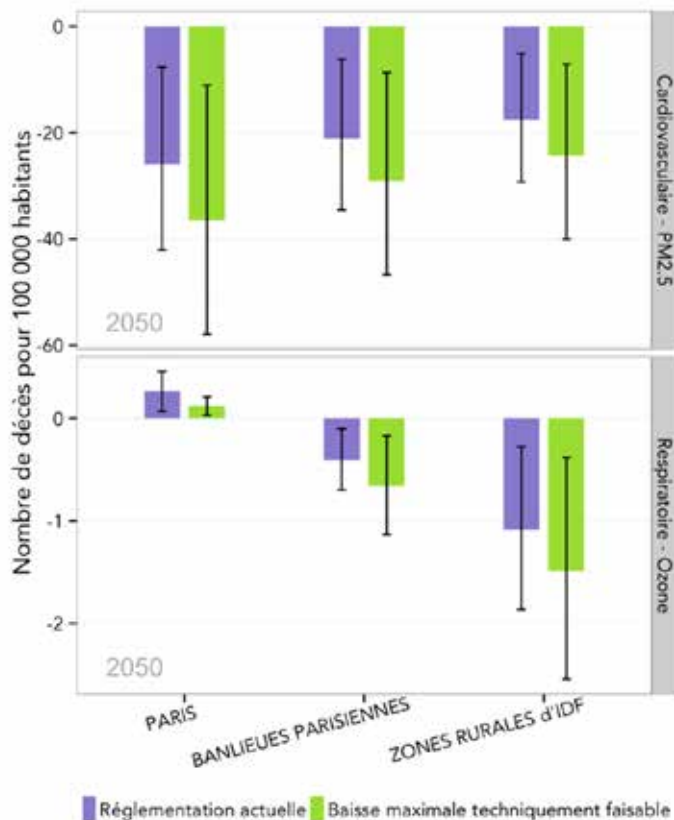


lions d'européens étaient exposés à des niveaux de particules supérieurs à la valeur recommandée par l'Organisation mondiale de la santé. Si la réglementation actuelle est respectée, ce nombre pourrait être diminué de moitié en 2030 et cent neuf mille décès, pour causes cardiovasculaires, pourraient être retardés chaque année à partir de cette même année. Les effets seraient particulièrement bénéfiques pour les pays situés dans le triangle formé par la Belgique, la Roumanie et les pays baltes et seraient encore plus prononcés, selon l'hypothèse MFR, en Allemagne et en Ukraine notamment. Toujours selon cette hypothèse optimiste, le centre et le sud du continent européen seraient davantage concernés par les effets bénéfiques de la réduction de la concentration en ozone.

**Figure 11**  
Évolution des concentrations annuelles de particules fines ( $PM_{2.5}$ ) en 2030 par rapport à 2010, estimée selon le scénario de mise en œuvre des réglementations actuelles (en haut) et le scénario baisse maximale techniquement faisable (en bas).  
Source : projet ACHIA.



**Figure 12**  
Évolutions des décès associés aux évolutions des particules fines (vert) et de l'ozone (rose) en Europe en 2030 par rapport à 2010 – réglementation actuelle CLE (gauche), baisse maximale techniquement faisable MFR (droite) (pour 100 000 habitants).  
Source : projet ACHIA.



**Figure 13**  
Évolution du nombre de décès associés aux évolutions des particules fines (en haut) et de l'ozone (en bas) en Île-de-France en 2050 par rapport à 2010 pour les deux scénarios CLE (violet) et MFR (vert) (pour 100 000 habitants).  
Source : projet ACHIA.

En Île-de-France, le resserrement de la maille de la grille permet de modéliser finement les impacts des scénarios de réduction en 2050 en fonction de la localisation de la population. Le scénario MFR apporte des bénéfices plus élevés que le scénario CLE en matière de MCV, essentiellement dans le centre de l'agglomération, où se situe l'essentiel des habitants. Les impacts positifs sont plus élevés pour l'Île-de-France dans les simulations réalisées à l'échelle régionale que dans celles réalisées à l'échelle européenne. Ces différences proviennent probablement du fait que les échelles plus fines permettent de localiser les effets sur les zones les plus peuplées, mais aussi peut-être du fait que la même fonction reliant concentrations et effets sur la surmortalité a été utilisée pour toutes les échelles.

Le projet ACHIA a donc largement atteint ses objectifs en mobilisant avec succès des équipes multidisciplinaires pour proposer un modèle robuste d'estimation des effets de l'évolution des concentrations en  $PM_{2,5}$  et en ozone sur la santé, bien qu'il n'ait pas été possible de relier

ces évolutions aux différents scénarios climatiques aussi précisément que cela aurait été souhaitable. Les différences entre les résultats obtenus à des échelles différentes montrent l'importance des études à des échelles géographiques fines.

Des méthodes similaires peuvent être employées pour évaluer les impacts directs de la hausse des températures sur la santé. Une étude récente<sup>3</sup> a effectué une projection des effets saisonniers de cette hausse prévisible dans le quartier de Manhattan, à New-York. L'étude, qui se fonde sur les séries quotidiennes des températures maximales et de la mortalité de 1982 à 1999, laisse apparaître un lien fort entre les deux types de données. La relation entre les deux séries a été modélisée par régression afin de prévoir les impacts futurs en se fondant sur deux des scénarios du GIEC et sur seize modèles climatiques. Comme dans l'étude précédente, les résultats du modèle sont comparés à la trajectoire de base de la mortalité à New-York. Le modèle montre que la mortalité hivernale devrait diminuer alors que les pics de température provoqueraient une plus forte surmortalité estivale, le solde global de la mortalité annuelle étant en nette hausse par rapport à la situation actuelle. La hausse de la mortalité serait en particulier très forte en mai et en septembre. Il est donc possible d'associer la mortalité à la courbe des températures maximales quotidiennes. L'étude montre également que les scénarios de plus forte hausse des émissions de gaz à effet de serre entraînent des surmortalités plus importantes. Cependant, l'étude s'est fondée sur une hypothèse de population stable et n'a pas pris en compte les éventuelles mesures d'adaptation au changement climatique : les futurs travaux devront prendre en compte ce type d'évolutions pour apporter des projections plus précises. ■

3 Tiantian Li, Radley M. Horton, Patrick L. Kinney, « Projections of seasonal patterns in temperature-related deaths for Manhattan, New York », 2013, *Nature Climate Change*, 3, 717-721, doi:10.1038/nclimate1902.

# Changement climatique, pollens et allergies

Nicolas Viovy

Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (LSCE)

Acronyme : **PAC**  
*Pollens, allergies, climat*

Porteur : Nicolas Viovy (LSCE)  
Début : 2008  
Durée : 36 mois  
Labo. GIS : LSCE, LISA, LMD, PIFO  
Labo. Hors GIS : Réseau national de surveillance aérobiologique (RNSA)  
Centre régional de veille et d'action sur les urgences (CERVEAU)  
Centre d'écologie fonctionnelle et évolutive (CEFE)

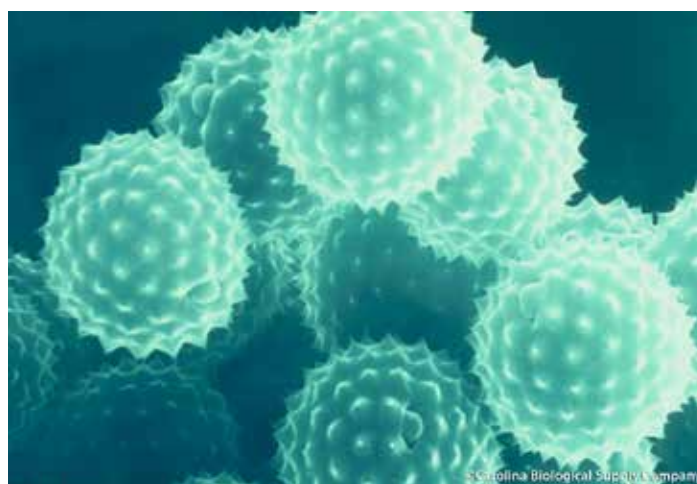


*Le projet PAC visait à construire un modèle simulant les concentrations en pollens à partir des paramètres météorologiques, d'un modèle de floraison, d'un modèle de production quotidienne de pollen, des données de distribution spatiale des plantes et d'un modèle de transport atmosphérique. Les travaux menés visaient à modéliser les concentrations aériennes en pollen pour déboucher sur la constitution de cartes de risque allergique. Le projet a été prolongé à l'échelle européenne par le projet « Atopic diseases in changing climate, land use and air quality » (ATOPICA, 2011-2015).*

Le nombre d'allergies a été multiplié par trois depuis vingt-cinq ans : les pollens deviennent donc une question importante de santé publique. De par ses effets globaux sur les organismes, le changement climatique peut favoriser une sensibilité plus importante aux allergies. Il affecte également directement la source pathogène par son influence sur les productions des végétaux. Le projet PAC s'est d'abord intéressé au bouleau, dont la distribution géographique assez stable dans le temps a permis de constituer des cartes de production de pollen dans les régions françaises. Cette première étape a permis de déboucher sur le projet européen ATOPICA dont l'objectif était de construire l'évaluation du risque d'allergie au pollen d'ambrosie sous la contrainte du changement climatique. Cette plante herbacée invasive a été introduite d'Amérique du Nord il y a environ cinquante ans et se développe beaucoup dans les pays des Balkans. Elle est présente en France, dans la région lyonnaise, et est la plante la plus allergène connue car elle produit des quantités considérables de pollen. Dans ce contexte, le LSCE a mis en place des cartes de distribution et de concentration en pollen de l'ambrosie. L'établissement

de cartes de localisation de l'ambrosie est beaucoup plus difficile que pour le bouleau, car l'espèce est mobile et les données partielles. Cependant, en partant de l'hypothèse que la plante ne se développe que dans les aires cultivées et urbaines (Storkey et al. 2014), les chercheurs ont pu dresser une carte de présence (et non de densité) de l'espèce par carré de dix kilomètres de côté à l'échelle de l'Europe.

Un modèle phénologique permet de simuler à quelle période la plante fleurit et le modèle de végétation ORCHIDEE permet de simuler la quantité de pollen produite. Le couplage de ce modèle à un modèle de transport atmosphérique permet de construire des cartes de concentrations quotidiennes. Le modèle a été calibré et validé par rapport aux observations 2000-2012 du réseau *European Aeroallergen Network* (EAN), qui relève, jour après jour, les quantités de pollens dans ses stations. Les concentrations peuvent dépasser sept cent cinquante grains par mètre cube et par jour pour les zones les plus infectées, alors que l'on estime que les impacts allergènes peuvent apparaître à partir de dix grains par mètre cube. La correspondance entre le modèle et les données observées est satisfaisante, puisque



**Figure 14**  
Pollen d'ambrosie  
© Carolina Biological Supply Company



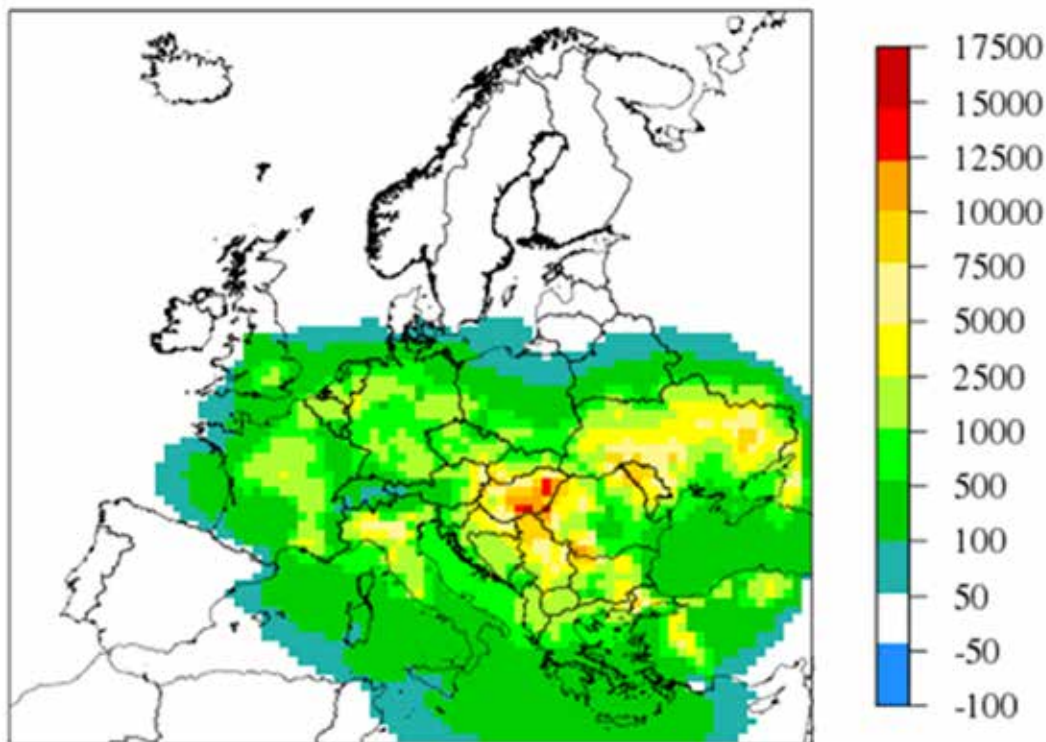
le coefficient de corrélation est, sur la période 2000-2012, supérieur à 0,5 pour 75 % des sites dont la concentration dépasse dix grains par mètre cube. Des écarts apparaissent cependant entre les niveaux des pics de concentration réels et simulés.

Afin d'estimer l'évolution de la distribution de l'ambrosie sur les périodes 2021-2040 et 2041-2060, les scénarios climatiques RCP 4.5 et RCP 8.5 ont été utilisés. Le modèle de distribution se fonde sur la vitesse de propagation des graines, sur les conditions climatiques de survie et sur l'évolution de l'utilisation des terres. Compte tenu des incertitudes, trois scénarios d'invasion (standard, rapide et lente) ont été élaborés et déclinés selon les deux scénarios climatiques.

La prise en compte de la variation du climat et de la dynamique d'invasion débouche sur une augmentation des concentrations beaucoup plus importante dans toute la zone infectée, puisqu'elle pourrait atteindre jusqu'à cent cinquante grains de pollens par mètre cube dans certaines régions. L'effet d'invasion du continent par l'ambrosie est du même ordre que l'effet de fertilisation du CO<sub>2</sub>, la variable climatique étant secondaire.

Le projet ATOPICA a donc pu établir une chaîne de modélisation complète de la concentration atmosphérique du pollen de l'ambrosie, ce qui permet d'étudier les impacts de l'ensemble des paramètres pris en compte avec un degré de confiance

### RCP4.5 II 2050 minus HIST total pollen



**Figure 15**  
Différence de production de pollen entre 2050 et 2010 pour le scénario RCP4.5 et le modèle de transport CHIMERE.  
© L.Laguel / projet ATOPICA.

Si l'on ne fait varier que le climat, il apparaît que les concentrations en pollen s'élèvent largement en Europe. Cette prévision est liée au développement de la biomasse. L'effet de fertilisation du CO<sub>2</sub> prédomine et l'emporte sur les effets négatifs du stress hydrique, qui augmente, notamment dans les régions centrales de l'Europe. Il faut néanmoins demeurer prudent quant à la prévisibilité réelle du modèle, car d'autres facteurs limitants, tel que le taux d'azote des sols, jouent un rôle différent suivant les espèces de végétaux.

satisfaisant par rapport aux données des relevés des stations. Bien que des incertitudes demeurent, notamment sur la distribution de la plante, le projet établit que le changement global participera à la hausse de la production de pollen, ceci d'autant plus que l'évolution prévisible du climat élargira la niche écologique potentielle de l'espèce en Europe. Cela renforce l'importance des mesures de suivi et d'éradication de l'ambrosie. Il reste toutefois aux chercheurs du projet ATOPICA à établir le lien entre ces résultats et la création de cartes du risque médical, ce qui exigera encore plusieurs années de travaux. ■



# Changement climatique, écosystèmes et radioactivité

Anders Möller

Laboratoire Ecologie systématique et évolution (ESE).

Acronyme : **RADIOCLIMFIRE**  
*Radioactivity, climate, fire and human health:*  
*A second Chernobyl catastrophe about to happen?*



Porteur : Anders Möller (ESE)  
Début : 2012  
Durée : 24 mois  
Labo. GIS : ESE et LSCE  
Labo. Hors GIS : Université de Caroline du Sud (Etats-Unis)  
Université d'Alabama (Etats-Unis)

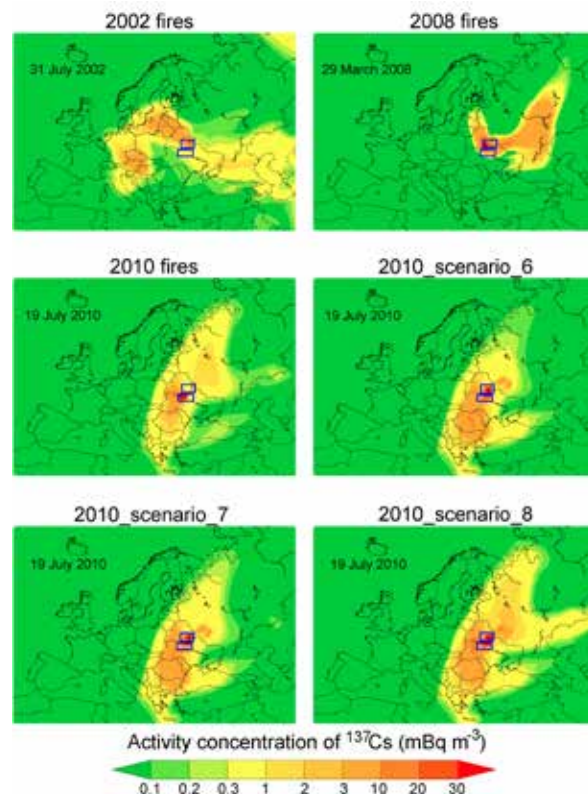
*Le projet de recherche RADIOCLIMFIRE visait à s'interroger sur les impacts potentiels du changement climatique sur l'occurrence des feux de forêts et de ses incidences potentielles sur la santé humaine compte tenu de la possibilité de remise en circulation aérienne d'une partie de la radioactivité stockée dans les plantes depuis l'accident de Tchernobyl.*

Après l'accident de Tchernobyl de 1986, une très importante quantité de Césium 137 ( $^{137}\text{Cs}$ ) se répand dans une large zone allant de l'Ukraine et de la Biélorussie jusqu'aux Alpes. Les quantités les plus importantes sont déposées à l'ouest et au nord de Tchernobyl. De larges zones représentant plusieurs milliers de kilomètres carrés sont alors totalement interdites d'accès et sont peu à peu regagnées par la forêt et, plus généralement, par la végétation, qui produit une importante biomasse : la surface occupée par la forêt boréale passe alors de 50 % en 1986 à 75 % actuellement. En outre, l'absence de gestion forestière maximise la probabilité de propagation des incendies.

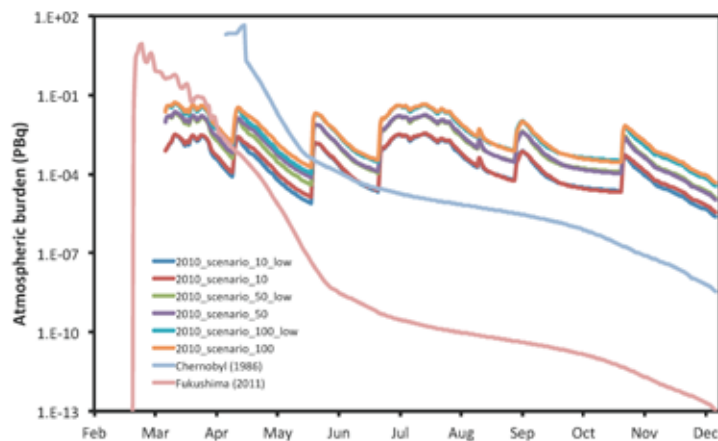
Selon les observations satellitaires rassemblées par Barnaba et al. (2012), les feux de forêt se déclenchent principalement dans la zone considérée durant le printemps et l'été. Les incendies des 31 juillet 2002, 20 mars 2008 et 19 juillet 2010 ont été simulés, en prenant en compte les conditions météorologiques associées permettant ainsi de modéliser, grâce au couplage des modèles d'atmosphère, de feux et de végétation (figure 16), les panaches de  $^{137}\text{Cs}$  atmosphériques réinjectés par les feux dans l'atmosphère. Pour ces trois situations, les feux injectent du  $^{137}\text{Cs}$  dans les deux premiers kilomètres de l'atmosphère. Afin d'évaluer les possibilités de déplacement de la radioactivité, trois hypothèses

d'injection verticale (2,9 km, 4,3 km et 6,0 km), correspondant à différents types de feux, ont été également simulées pour l'incendie du 19 juillet 2010.

Alors que l'explosion de la centrale de Tchernobyl a libéré une quantité de  $^{137}\text{Cs}$  équivalent à quatre-vingt-cinq mille térabecquerel (TBq) fin avril 1986, les six simulations d'incendies libèrent, sur une période de plusieurs mois et de façon quasi-continue, des quantités situées entre 290 TBq et 4200 TBq. Etant donné l'effet sur la santé du  $^{137}\text{Cs}$ , n'importe lequel des trois scénarii étudiés (10, 50 ou 100 % de la zone d'exclusion brûlée), constituerait un accident majeur sur l'échelle INES (*International Nuclear and Radiological Event Scale*).



**Figure 16**  
Émissions de  $^{137}\text{Cs}$  à partir de feux de forêts ayant été contaminées en Biélorussie et en Ukraine pour les feux de 2002, 2008 et 2010, et pour les trois scénarios de feux (2010\_scenario\_6, 2010\_scenario\_7 et 2010\_scenario\_8). Les rectangles bleus indiquent le lieu des forêts radioactives en Ukraine et en Biélorussie.  
Source : N. Evangelidou et al., 2015, « Fire evolution in the radioactive forests of Ukraine and Belarus: future risks for the population and the environment », *Ecological Monographs* 85:49–72.



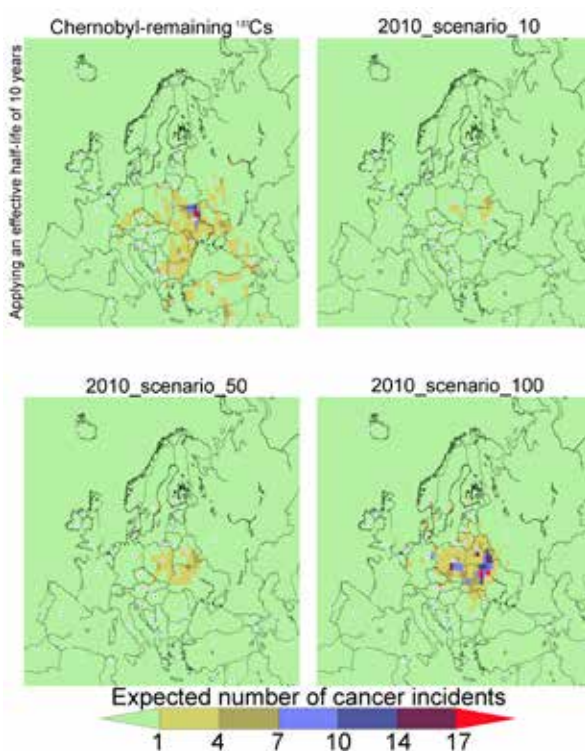
**Figure 17**

Contenus atmosphériques de  $^{137}\text{Cs}$  (PBq) pour une année de simulation et suivant les trois scénarios (2010\_scenario\_10, 2010\_scenario\_50, 2010\_scenario\_100) et les deux paramétrisations d'injection dans l'atmosphère : l'une « low », indiquant un niveau d'injection relativement bas (2.9 km), et une seconde plus haute (6.0 km). Les mêmes quantités atmosphériques que celles des incidents de Chernobyl (1986) et de Fukushima (2011) sont aussi simulées par le modèle afin de pouvoir comparer avec l'ampleur des émissions produites dans les scénarios étudiés.

Adapté de Evangeliou et al., 2014b, *Wildfires in Chernobyl-contaminated forests and risks to the population and the environment : A new nuclear disaster about to happen?*, Environment International, 2014.08.012, 73, 346–358.

Il a aussi été possible de modéliser les zones où le  $^{137}\text{Cs}$  s'est déposé, ou se déposerait, dans ces six cas de figure, ainsi que le cumul des quantités déposées, qui varient, dans le cas de l'incendie de 2002 par exemple, de plus de 40 Bq m<sup>-2</sup> à proximité des lieux d'incendies à 1 à 3 Bq m<sup>-2</sup> pour

l'Italie ou la région de Moscou. Par comparaison, la radioactivité provenant de l'incident de Tchernobyl correspond, encore en 2010, à une accumulation de plus de 40 000 Bq m<sup>-2</sup> sur les lieux du dépôt initial. Mais les feux de forêt possèdent la capacité d'étendre l'irradiation du  $^{137}\text{Cs}$  au-delà du lieu de dépôt initial de 1986.



**Figure 18**

Surnombre d'apparition de cancers dus à l'exposition au  $^{137}\text{Cs}$  (dans l'air, par dépôt, par inhalation et par ingestion). Calcul du taux d'incidence par exposition au dépôt de  $^{137}\text{Cs}$  restant de l'incident de Chernobyl (corrigé d'une demie-vie utile de 10 ans, Bergan, 2000). Tous les taux de mortalité ou d'apparition de cancers ont été calculés pour une population relative à l'année 2010 afin d'obtenir le nombre d'individus qui contracteraient ou mourraient de cancer. Les points blancs indiquent les grands centres de population urbaine.

Source : N. Evangeliou et al., 2015. *Fire evolution in the radioactive forests of Ukraine and Belarus: future risks for the population and the environment. Ecological Monographs* 85:49–72.

Alors que l'incendie de 2002 a déjà atteint 8 % de la surface de la zone contaminée, le projet RADIOCLIMFIRE visait à étudier les effets d'incendies massifs. Des scénarios ont été établis sur la base de l'incendie de 2010 pour des surfaces incendiées de 10 %, 50 % et 100 % des zones d'exclusion d'Ukraine, de Biélorussie et de Russie, en reprenant les hypothèses de hauteur d'injection citées ci-dessus. Ces hypothèses ne sont pas aberrantes compte tenu du non entretien de la zone et de l'impossibilité d'agir sur les feux autrement que par l'action de canadiens. Les scénarios relatifs à des surfaces incendiées de 50 % et de 100 % des zones d'exclusion libéreraient des quantités de l'ordre de 290 à 4200 TBq de  $^{137}\text{Cs}$ , quantités comparables à celles libérées par le site de Tchernobyl à partir de juillet 1986 et par celui de Fukushima à compter de mai 2011 (Figure 17). Cette dose annuelle est non négligeable. Ses effets ont été évalués à partir de l'outil ERICA, utilisé par l'Union européenne et par l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA), en se fondant sur l'hypothèse LNT (effets linéaires des doses reçues sur les risques de cancer), couramment utilisée pour évaluer les impacts des cumuls de doses sur les risques de cancers. Selon ces modèles, le scénario d'un incendie de type 2010, qui couvrirait 100 % des zones d'exclusion, déboucherait sur vingt à deux cent quarante cas de cancers supplémentaires, dont la moitié avec issue fatale (Figure 18). Un certain nombre d'impacts sur la faune et la flore ont également été évalués, sans tenir compte des effets cumulatifs chez les animaux : ces effets existent, mais sont moindres comparés à ceux subis lors de l'accident de 1986. ■

*Changement  
climatique,  
santé et maladies  
infectieuses*



# Ecologie de la santé : vers une approche intégrée

Serge Morand

CNRS-CIRAD, centre d'infectiologie Christophe Mérieux (Laos) et Faculté de médecine tropicale, université Mahidol (Thaïlande)

L'écologie de la santé est une discipline nouvelle, déjà bien reconnue et soutenue par des programmes nationaux et internationaux, qui s'intéresse tout particulièrement à la transmission des agents infectieux (ou de leurs vecteurs) dans les écosystèmes fortement modifiés par les activités humaines. En effet, l'impact des changements planétaires globaux se traduit par une recrudescence de l'émergence de maladies infectieuses liées, en majorité, aux animaux sauvages et domestiques. Les risques d'émergence de ces pathogènes sont plutôt situés dans les pays du Sud. Le rapport *Mapping of poverty and likely zoonoses hotspot*<sup>1</sup> (2012) montre que le nombre d'épidémies d'origine infectieuse augmente globalement, dans le monde, depuis 1940, mais que celles-ci s'homogénéisent à partir des années 1970 (les épidémies tendent à être de plus en plus globales). L'évaluation des risques et des causes de ces émergences nécessite de prendre en compte de nombreux facteurs tels que la répartition mondiale de la population, le rythme des émissions de CO<sub>2</sub>, les changements d'usage des terres, la baisse de biodiversité, la croissance économique. L'Afrique et l'Asie sont, de loin, les continents qui sont et seront les plus concernés tant par les changements globaux, dont climatiques, que par les émergences de maladies infectieuses.

## L'impact non négligeable des feux de forêts

La déforestation s'accompagne de feux de forêt récurrents notamment en Amazonie, dans les pays du bassin du Congo, en Asie du Sud-Est, au nord de l'Australie. Issus de pratiques traditionnelles d'exploitation, mais aggravés par le rythme de conversion des surfaces forestières, les feux de forêt émettent des nuages toxiques étendus causant de graves problèmes de santé publique à l'échelle de régions entières, pouvant être sources de tensions politiques entre pays riverains comme en Asie du Sud-Est.

Le changement climatique ne peut être, à lui seul, responsable de l'augmentation des épidémies de maladies infectieuses, quelles soient émergentes ou non. Plusieurs études montrent que ce dernier joue essentiellement un rôle dans les changements de distribution des pathogènes ou de leurs vecteurs. La distribution de ceux-ci suivent le déplacement des enveloppes climatiques (température, pluviométrie) avec le réchauffement climatique. Par contre, la variabilité climatique et les événements extrêmes sont des facteurs significatifs expliquant le rythme et la distribution des épidémies. Ainsi, les événements climatiques *El Niño* et *La Niña* sont corrélés avec certaines épidémies, souvent des maladies vectorielles affectant les humains ou leurs animaux domestiques en régions tropicales<sup>2</sup>.

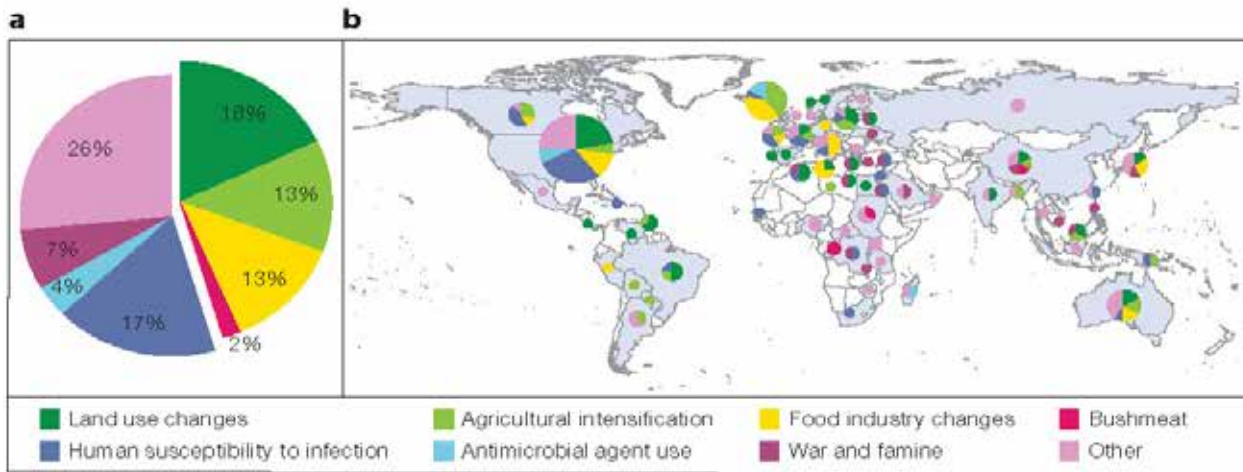
En Europe, de nombreuses maladies infectieuses sont également affectées par la variabilité climatique liée à l'Oscillation Nord Atlantique (NAO)<sup>3</sup>. Des modèles climatiques récents montrent que le changement climatique en cours va augmenter la variabilité climatique au cours des prochaines décennies et, par là même, affecter considérablement les dynamiques des maladies infectieuses<sup>4</sup>. Mais ce sont principalement les modifications de la biodiversité qui expliqueraient l'augmentation des émergences, du fait notamment des changements d'usage des terres, de l'intensification agricole, des invasions biologiques, ou de l'usage des antibiotiques. Les pays des régions intertropicales qui s'intègrent dans l'économie globale et le commerce international sont particulièrement concernés. Ainsi, les surfaces forestières des pays d'Asie du Sud-Est se sont réduites de manière importante

2 Anyamba, A., et al. (2012), « Climate teleconnections and recent patterns of human and animal disease outbreaks », *PLoS Neglected Tropical Diseases*, 6(1), e1465. doi:10.1371/journal.pntd.0001465.

3 Morand S., et al. (2013) « Climate variability and outbreaks of infectious diseases in Europe », *Scientific Reports* 3: 1774.

4 Cai, W., et al, 2015, « Increased frequency of extreme La Niña events under greenhouse warming », *Nature Climate Change*, (January), 8–13. doi:10.1038/NCLIMATE2492.

1 <http://www.ilri.org/node/1244>



**Figure 19**

Causes et localisations d'événements d'émergence de maladies infectieuses zoonotiques chez l'homme sur la période 1940-2005.

a, Répartition, au niveau mondial, des causes des événements d'émergence ;

b, Pays dans lesquels les événements d'émergence se situent et leurs causes. La taille du cercle représente le nombre d'événements (pour comparaison, ce nombre est de 59 pour les Etats Unis).

Source : F. Keesing et al., 2010.

dès la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle et continuent de diminuer sous la pression du développement économique et de la conversion des terres pour des produits agricoles d'exportation. Cette diminution des surfaces forestières est corrélée à une augmentation des épidémies de maladies vectorielles. La tendance semble être la même pour l'Afrique et pour l'Amérique du Sud.

La diversité des agents pathogènes est corrélée à la diversité des espèces sauvages de mammifères et d'oiseaux<sup>5</sup>. Une forte biodiversité signifie une forte diversité de maladies infectieuses. Conserver la biodiversité veut dire conserver les agents pathogènes, ce qui a des conséquences importantes pour la santé publique. Le dernier rapport *Living planet 2014* du *World Wildlife Fund*<sup>6</sup> considère que 50 % des espèces terrestres sont en déclin. Faut-il donc se réjouir de la disparition des pathogènes qui leurs sont associés ? Face à ces enjeux, les travaux de recherche, mais également les représentations que les chercheurs et la société peuvent s'en faire, jouent un rôle important dans les politiques de santé mises en place. Les écologistes considèrent que la santé humaine (et animale) dépend d'une biodiversité riche. Les épidémiologistes mettent en avant les risques de transmission de pathogènes de la faune sauvage par les animaux domestiques. En 2013, une étude a estimé que plus de trois cent milles espèces de virus seraient potentiellement

hébergés chez les mammifères, dont les chauves-souris<sup>7</sup>. Les auteurs de cette étude proposent une caractérisation complète de ces virus estimée à quatre milliards de dollars américains, ce qui serait, selon eux, bien moins cher que les conséquences d'une prochaine pandémie. Pourtant, six mois après, l'épidémie Ebola frappait trois pays d'Afrique de l'Ouest. Cette épidémie est-elle due uniquement aux chauves-souris qui seraient le réservoir du virus, ou ne serait-elle pas la conséquence de la déstructuration des systèmes de santé publique due à des décennies de guerres civiles, d'ingérence étrangère et, finalement, de pertes de la confiance vers les autorités (politiques, sanitaires, scientifiques) ? Les décisions qui sont prises en terme de santé ne dépendent pas seulement du savoir scientifique et médical mais, bien souvent, du contexte politique et social.

Les controverses scientifiques concernant le rôle de la biodiversité dans la régulation des épidémies (et des émergences) se poursuivent également<sup>8</sup>. Des articles originaux sur la maladie de Lyme (due à une bactérie transmise par des tiques) montrent qu'une biodiversité élevée réduit les risques de transmission par dilution des pathogènes. Des chercheurs sont parvenus à des conclusions similaires pour la transmission de l'agent de la fièvre du Nil occidental aux États-

5 Dunn, R., et al, 2010, « Global drivers of human pathogen richness and prevalence », *Proceedings, Biological Sciences / The Royal Society*, 277(1694), 2587-95.

6 [http://wwf.panda.org/about\\_our\\_earth/all\\_publications/living\\_planet\\_report/](http://wwf.panda.org/about_our_earth/all_publications/living_planet_report/)

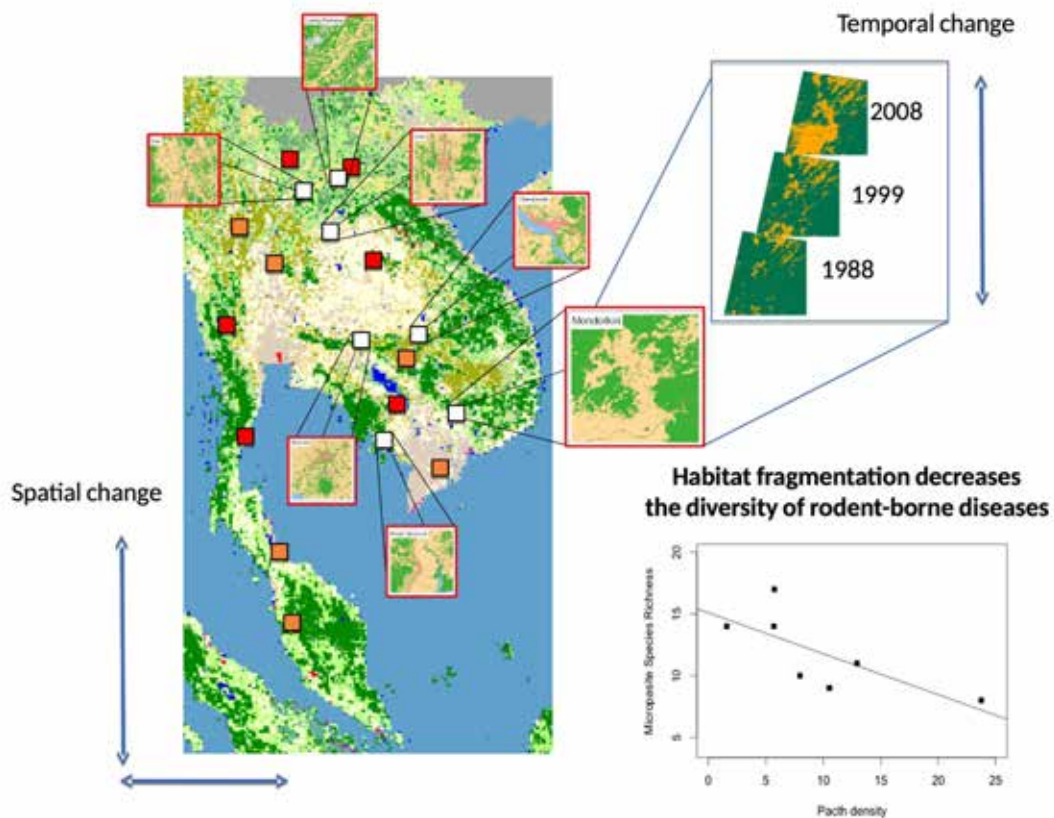
7 Anthony, S.J. et al., 2013, « A Strategy To Estimate Unknown Viral Diversity in Mammals » *mBio* vol. 4 no. 5 e00598-13.

8 Keesing, F., et al., 2010, « Impacts of biodiversity on the emergence and transmission of infectious diseases », *Nature*, 468(7324), 647-52. doi:10.1038/nature09575.

Unis. Les territoires riches en diversité d'espèces d'oiseaux sont également ceux qui présentent une incidence de la maladie plus faible chez les humains. Cependant, ces résultats sont contestés par une méta-analyse qui les considère comme des phénomènes locaux sans portée générale<sup>9</sup>. Il n'y aurait pas de relation entre la richesse en biodiversité et la régulation de la transmission des pathogènes. Cela concerne, non seulement les maladies infectieuses humaines, mais également celles des animaux ou des plantes<sup>10</sup>.

Face à ces désaccords scientifiques, il convient de renforcer les études de terrain. L'Asie du Sud-Est cumule les mutations écologiques et l'émergence de maladies infectieuses nouvelles (grippe aviaire, SRAS, Nipah) dans une région présentant aussi une

grande diversité culturelle. Dès 2004, Sodhi a alerté sur l'importance de la crise affectant la biodiversité de cette région<sup>11</sup>. Cette crise de la diversité biologique s'accompagne d'une augmentation des maladies infectieuses liées aux animaux : une corrélation est observée entre les épidémies zoonotiques et le nombre d'espèces en danger. L'augmentation des épidémies semble donc liée aux pertes en biodiversité. La variabilité climatique n'est pas en reste. Au cours des quinze dernières années, les épidémies de leptospirose ou de typhus des broussailles en Thaïlande sont associées aux occurrences d'*El Niño* et de *La Niña*. Les projets CERoPath et BiodivHealthSEA, financés par l'Agence nationale de la recherche, ont permis d'acquérir des données uniques sur les pathogènes hébergés par les rongeurs



**Figure 20**

Analyse des changements de fragmentation des habitats dans l'espace et dans le temps (30 dernières années) en Asie du Sud-est continentale. La fragmentation des paysages est associée à une perte en diversité de maladies infectieuses liées aux rongeurs. La perte de biodiversité impliquerait donc également une diminution des maladies zoonotiques à l'échelle locale. Cependant, les risques restent élevés pour la transmission des pathogènes qui sont favorisés dans des localités dont les habitats sont très fragmentés.

Source : projets ANR CERoPath et BiodivHealthSEA.

9 Salkeld, D. J., et al., 2013, « A meta-analysis suggesting that the relationship between biodiversity and risk of zoonotic pathogen transmission is idiosyncratic », *Ecology Letters*, 16(5), 679–86. doi:10.1111/ele.12101.

10 Cardinale, B. J., et al., 2012, « Biodiversity loss and its impact on humanity », *Nature*, 486(7401), 59–67. doi:10.1038/nature11148.

11 Sodhi, N. S., et al., 2004, « Southeast Asian biodiversity: an impending disaster », *Trends in Ecology & Evolution*, 19(12), 654–60. doi:10.1016/j.tree.2004.09.006.

sauvages et péridomestiques dans des localités de Thaïlande, du Laos, du Cambodge et du Vietnam<sup>12</sup>. La diversité et la structuration des assemblages des pathogènes et parasites de rongeurs sont confrontées aux modes d'occupation des sols et à la dynamique de leurs changements d'usage. Les analyses spatiales montrent des baisses de diversité des pathogènes en lien avec le déclin des surfaces forestières. Par contre, certains pathogènes semblent bénéficier de la fragmentation des habitats, et présentent ainsi des risques pour les populations humaines. Ces résultats sont à rapprocher des données humaines issues des hôpitaux.

Les données acquises sur le long terme sont nécessaires mais ne deviennent pertinentes que si elles sont associées à des données socio-économiques et politiques. L'enjeu est donc d'intégrer cartes administratives, cartes d'usages des sols et de leurs transformations, cartes culturelles (représentations), cartes épidémiologiques et cartes écologiques. Ces cartes se basent sur des concepts et des logiques souvent différentes. Enfin, on ne sait pas encore

définir ce que sont des services de régulation écosystémiques, des maladies infectieuses et encore moins comment les spatialiser<sup>13</sup>. Dépendent-ils de services écosystémiques d'approvisionnement et de régulation ? Quelles sont les fonctions qui les supportent ? Comment les évaluer économiquement ? Ce sont des enjeux de recherche importants pour la santé, pour la conservation, mais aussi pour le développement. En effet, c'est seulement à partir de la connaissance des dynamiques territoriales, des enjeux et pouvoirs des différents acteurs face au changement global, qu'il sera possible d'établir des scénarios intégrant les services écosystémiques, dont ceux de régulation des maladies. Ces recherches plaident pour la mise en place de réseaux de stations d'observation et d'expérimentation à l'image du projet NEON (*National Ecological Observatory Network*)<sup>14</sup> qui inclut des suivis au long terme de la dynamique écologique des maladies infectieuses associées à la faune sauvage aux États-Unis. ■

12 Morand S, et al., 2015, « Assessing the distribution of disease-bearing rodents in human-modified tropical landscapes », *Journal Applied Ecology* [ahead of print] doi: 10.1111/1365-2664.12414.

13 Morand S., Binot A., 2014, « Quels services rendus par les écosystèmes ? » In Morand S., Moutou F., Richomme C. (eds), 2014, *Faune sauvage, biodiversité et santé, quels défis ?* pages 147-155, Editions Quae.

14 <http://www.neoninc.org/>



**Figure 21**  
Région de Luang Prabang, Laos.  
« La déforestation s'accompagne de feux de forêt récurrents... »  
© Shankar. S / Flickr.

# Méningites, poussières et climat au Sahel<sup>1</sup>

Béatrice Marticorena

Laboratoire inter-universitaire des systèmes atmosphériques (LISA)

Acronyme : **ADCEM**  
*Impact des aérosols désertiques et du climat sur les épidémies de méningite au Sahel*



Porteur : Béatrice Marticorena (LISA)  
Début : 2009  
Durée : 36 mois  
Labo. GIS : iEES, LISA, LMD, LOCEAN  
Labo. Hors GIS : BIOGEOSCIENCES (équipe CRC)  
Laboratoire d'optique appliquée (LOA)  
Laboratoire de traitement de l'information (LTI)  
MIVEGEC

*La méningite cérébro-spinale est un problème de santé publique majeur dans plusieurs pays d'Afrique composant « la ceinture des méningites » qui s'étend du Sénégal à l'Éthiopie.*

*Le projet ADCEM visait à développer une approche intégrée de l'étude du lien entre aérosols, climat et méningites afin de contribuer à la mise au point d'un système de prévision des conditions environnementales favorables au développement des épidémies en Afrique de l'Ouest. La plupart des résultats présentés ci-dessous sont issus de la thèse d'Adrien Deroubaix (2013), financée par le projet.*

Les épidémies de méningites (inflammations des méninges) étudiées ici sont dues essentiellement à la bactérie *Neisseria meningitidis* (Nm) (transmission inter-humaine). Ces épidémies sont très présentes dans la bande sahélienne : elles y sont observées pendant la saison sèche, de janvier à mai, avec un maximum au mois de mars. Elles impliquent principalement le sérotype A de la bactérie, mais aussi les sérotypes X et W135. Vingt-cinq mille à deux cent cinquante mille cas – essentiellement des enfants de moins de quinze ans – sont recensés chaque année, avec une mortalité de l'ordre de 10 % et des séquelles neurologiques importantes chez 10 à 20 % des survivants.

La région sahélienne est soumise, durant le premier trimestre de l'année, au régime d'Harmattan, un vent de nord-est chaud, sec et chargé en poussières (aérosols) venant du Sahara. Au troisième trimestre, l'arrivée de la mousson par le sud-ouest soumet la région à de fortes précipitations et à un temps humide. Les épidémies de méningites se développent au cours de la saison sèche alors que les températures sont très élevées et les vents relativement faibles. Les événements de poussières les plus intenses ont lieu chaque année au premier trimestre. De façon générale, les concentrations journalières en poussières, mesurées au Sahel, dépassent largement la limite européenne de 50 µg/m<sup>3</sup> (à ne pas dépasser plus de trente-cinq jours par an) plus de 50 % du temps, avec des pics pouvant dépasser 500 µg/m<sup>3</sup>. La dynamique de ces événements est maintenant très étudiée et dépend beaucoup des conditions météorologiques, mais les concentrations restent très difficiles à prévoir.

Les hypothèses émises sur le lien entre la poussière et la méningite sont multiples. L'air chaud, sec et poussiéreux pourrait irriter les muqueuses et faciliter le passage de la bactérie, présente dans les voies naso-pharyngées, dans le système sanguin. Le phénomène pourrait aussi être favorisé par la solubilisation du fer contenu dans les poussières. Enfin, il est aussi possible que le confinement de la population durant cette saison facilite la transmission de l'agent. Le projet ADCEM se fondait sur la première hypothèse, également retenue par Martiny et Chiapello (2013), puisque l'apparition de l'humidité

## 1 Références

Agier L, Deroubaix A, Martiny N, Yaka P, Djibo A, Broutin H, « Seasonality of meningitis in Africa and climate forcing: aerosols stand out », *J. R. Soc. Interface*, 10(79):20120814, 2012.

Deroubaix A., N. Martiny, I. Chiapello, B. Marticorena, « Suitability of OMI aerosol index to reflect mineral dust surface conditions: Preliminary application for studying the link with meningitis epidemics in the Sahel », *Remote Sens. Environ.*, 133, 116–127, 2013.

Deroubaix A., « Étude des relations entre les aérosols désertiques, le climat et les épidémies des méningites en Afrique de l'Ouest : diagnostic et prévisibilité » ; thèse de l'Université Pierre et Marie Curie; direction de thèse : S. Thiria (LOCEAN) et N. Martiny (BIOGEOSCIENCES, équipe CRC, Dijon); 17 septembre, 2013.

Martiny N., I. Chiapello, « Assessments for the impact of mineral dust on the meningitis incidence in West Africa », *Atmospheric Environment*, 70:245-253, 2013.



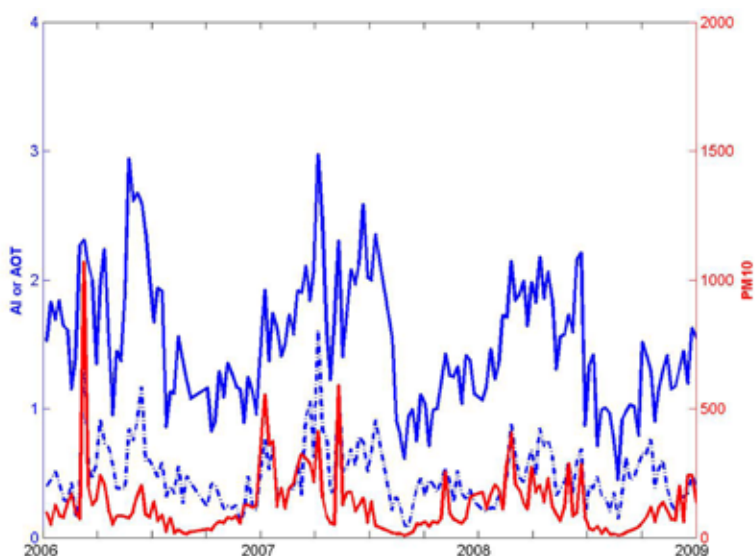
coïncide avec la disparition des épidémies, et qu'à l'échelle nationale, le décalage moyen d'une à deux semaines entre l'occurrence des poussières et le nombre de cas de méningites correspond au temps d'incubation, d'une dizaine de jours en moyenne, de *Neisseria Meningitidis*.

Le projet visait à évaluer le lien entre la saisonnalité de l'épidémie et les conditions atmosphériques, afin de prévoir l'influence de ces conditions. Il se fondait sur les données épidémiologiques hebdomadaires de l'OMS, i.e. cas suspects de méningite, entre 1998 et 2008, recensées par district pour le Mali, le Niger et le Burkina-Faso, pays les plus touchés par les épidémies. Les séries de températures, d'humidité relative, et de direction et de vitesse du vent sur la même période provenaient des réanalyses ERA-Interim du Centre européen de prévisions à moyen terme. Le contenu atmosphérique en aérosols, quant à lui, a été évalué à partir des concentrations de surface en aérosols (deux stations TEOM du *Sahelian Dust Transect* au Niger et au Mali), des mesures au sol du contenu intégré verticalement et d'un indicateur satellitaire.

Les données les plus adaptées pour ce type d'étude sont les concentrations de surface, mais elles ne sont disponibles qu'en quelques stations au Sahel. Le projet ADCEM a travaillé sur la possibilité d'utiliser les contenus intégrés mesurés au sol ou depuis l'espace pour estimer les concentrations en surface dans toute la région sahélienne. La qualité de la relation entre l'épaisseur optique en aérosols et la concentration de surface en aérosols, mesurées sur toute l'année, n'est, en fait, pas suffisante pour

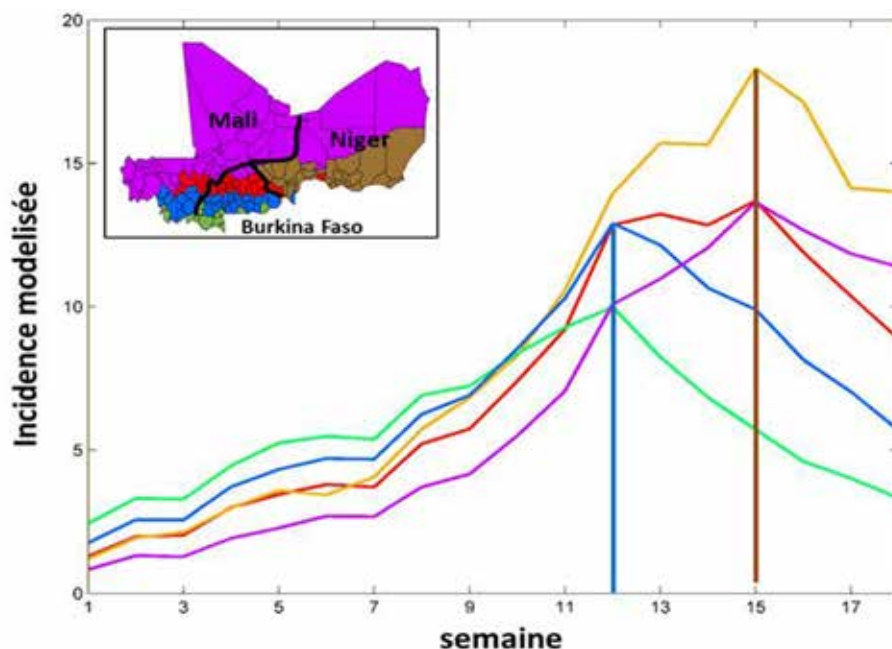
être utilisée de façon générale. En particulier, les maxima saisonniers des concentrations de surface, de l'épaisseur optique en aérosol et de l'indice satellite d'aérosol ne sont pas phasés (figure 22). En séparant la saison d'Harmattan en types de temps, il a été possible d'établir des pentes de régression pour chaque type de temps, afin d'estimer les concentrations de surface à partir des données d'épaisseur optique (Yahi et al., 2013). Il a donc fallu corriger l'indicateur satellitaire de présence d'aérosol d'un biais saisonnier moyen, à partir des concentrations de surface mesurées aux stations, afin d'être en mesure de calculer un indice d'aérosol représentatif des concentrations de surface au Sahel sur la période épidémique. Une série temporelle continue de cet indice d'aérosol « transformé » a ainsi été constituée (Agier et al., 2012). L'ensemble des données a ensuite été rassemblé pour la période 1997-2008 à l'échelle des districts, des régions et des pays et agrégé par périodes hebdomadaires pour le Niger, le Mali et le Burkina Faso.

Les différences de phases entre les variations saisonnières des données climatiques et des indices d'aérosol « transformés » et des cas d'épidémies ont été identifiées par une analyse statistique en ondelettes (Agier et al. 2013). A l'échelle des districts au Niger, elle a démontré que le paramètre présentant le meilleur phasage avec le nombre de cas de méningites est l'indice d'aérosol, avec une grande cohérence entre les districts. Le décalage temporel d'une à deux semaines entre les cycles saisonniers des aérosols et les cas de méningites est cohérent avec les hypothèses précédemment déduites à l'échelle nationale ainsi qu'avec le temps d'incubation de la bactérie.



**Figure 22**  
Concentration en aérosol (PM10: Particulate matter smaller than 10µm) et épaisseur optique en aérosol (Aerosol Optical Thickness, AOT) mesurées à Banizoumbou (Niger) et indice d'aérosols (Aerosol Index, AI) de l'instrument OMI (Ozone Monitoring Instrument) de janvier 2006 à décembre 2009 en moyennes hebdomadaires.  
Figure adaptée de Deroubaix et al., 2013.

En second lieu, une analyse statistique en composantes principales a été conduite, d'abord sur les données climatiques et d'aérosols, puis en intégrant les données épidémiologiques. A l'issue d'une analyse menée en plusieurs temps, il ressort que les années de fortes épidémies sont marquées par l'association de conditions spécifiques de températures et de contenu en aérosols. Par ailleurs, une méthode statistique de régression linéaire multiple pas à pas a été conduite pour modéliser l'incidence des méningites à partir des variables climatiques et aérosols (figure 23). Les variables températures de l'air et indice d'aérosols « transformé » des semaines précédentes ressortent comme les mieux corrélées aux incidences de méningites. Le modèle fondé sur la régression ainsi obtenu explique un tiers de la variabilité de l'incidence à l'échelle des districts, des régions et des pays.



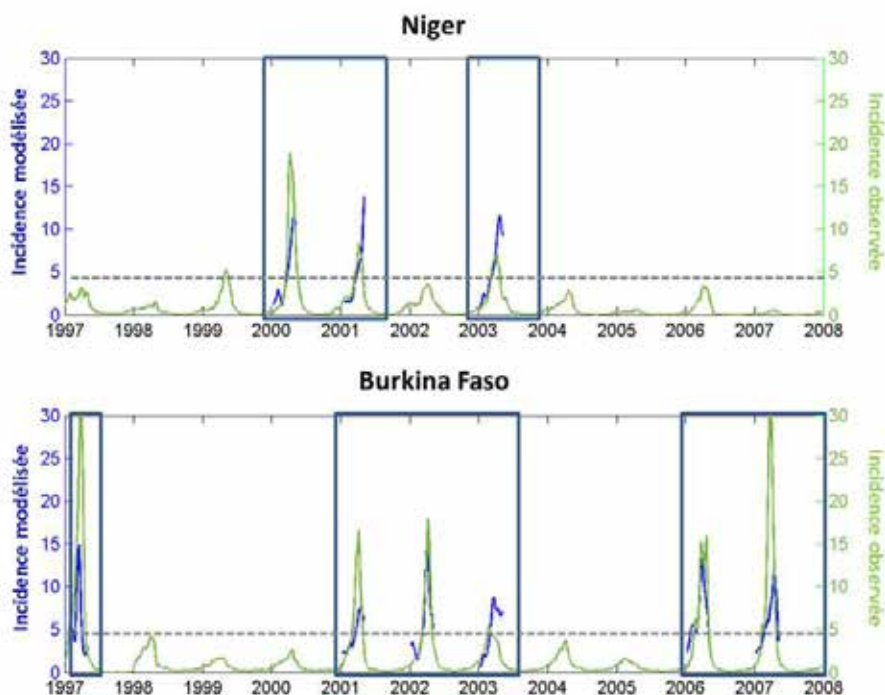
**Figure 23**  
Évolution temporelle de l'incidence (nombre de cas / 100000 personnes) de cas de méningite modélisée sur les trois pays ciblés (Mali, Niger, Burkina-Faso) en fonction de la température de l'air et de l'indice d'aérosols transformé pour les cinq catégories identifiées par une classification hiérarchisée.  
Figure adaptée de Deroubaix et al., 2013.

Le modèle permet de reproduire une partie de la variabilité spatiale de l'incidence des méningites. Les spécificités des épidémies observées, plus précoces au Burkina-Faso qu'au Niger et au Mali, et moins fréquentes au Mali, sont bien retrouvées par le modèle. Enfin, l'application du modèle dans les trois pays pour les années épidémiques reproduit bien la dynamique temporelle des phénomènes observés, avec un coefficient de corrélation entre les incidences observées et modélisées de 0,69 (figure 24). Le modèle reproduit également les dates de dépassement d'un seuil épidémique fixé à cinq cas pour cent milles habitants par semaine (i.e. seuil d'alerte défini par l'OMS), avec un coefficient de corrélation de 0,94.

Ces analyses montrent qu'il est possible d'utiliser des produits satellitaires d'aérosols pour étudier les impacts sur la santé (Deroubaix

et al. 2013), en tenant compte des biais liés à la répartition verticale des aérosols et en utilisant, notamment, des mesures *in-situ* de concentration d'aérosols de surface. Le modèle de l'incidence des méningites établi montre que les variations spatiales et temporelles des conditions de température et d'empoussièremment peuvent expliquer, à hauteur de 30 % environ, les variations observées dans l'incidence de méningites. Ce modèle pourrait contribuer à la construction d'un système d'alerte précoce ; néanmoins il nécessiterait de développer un modèle statistique applicable à toutes les

années (pas seulement épidémiques) et de pouvoir disposer, en temps réel, des concentrations de poussières au sol ou de pouvoir les prévoir correctement. ■



**Figure 24**  
Incidence (nombre de cas / 100000 personnes) de cas de méningite observée (vert) et modélisée (bleu) pour les années épidémiques (encadrées) au Niger et au Burkina-Faso entre 1997 et 2008 (la ligne horizontale signale le seuil épidémique de 5 cas / 100 000 personnes).  
Figure adaptée de Deroubaix et al., 2013.

# Climat et dynamique des *Vibrio* pathogènes humains<sup>1</sup>

Patrick Monfort

CNRS, laboratoire HydroSciences Montpellier

Acronyme: **CLIMVIB**

Climat et dynamique des *Vibrio* pathogènes humains



Porteurs: Sylvie Joussaume (LSCE)  
Patrick Monfort (laboratoire HydroSciences Montpellier)

Début: 2011

Durée: 24 mois

Labo. GIS: LSCE

Labo. Hors GIS: UMR 5119 Ecosym, Montpellier

Le projet d'incubation CLIMVIB visait à étudier la possibilité de développer un modèle prédictif permettant l'aide à la décision face aux risques d'épidémie à *Vibrio*, et de simuler la dynamique de ces *Vibrio* sous contrainte du changement global. Plusieurs actions ont été menées, dont deux séminaires de travail, afin d'examiner l'état des connaissances des différents domaines scientifiques et les pistes possibles d'investigations communes, ainsi que des mesures dans les eaux des lagunes du Golfe d'Aigues-Mortes dans le but de mieux préciser les relations entre les trois *Vibrio* pathogènes humains (*V. parahaemolyticus*, *V. vulnificus* et *V. cholerae*), la température et la salinité.

Cette étude a fait ressortir:

- le lien fort entre *Vibrio* et certaines conditions environnementales: température et salinité principalement;
- l'impact potentiel du changement climatique, qui pourrait induire une augmentation de la concentration en *Vibrio* suite à l'augmentation des températures de surface de la mer (SST) mais également, en Méditerranée, suite à l'intensification des pluies événementielles responsables de dessalures brutales;
- un potentiel de modélisation avec différentes approches suivant l'échelle spatiale considérée;
- la prise en compte de la difficulté de coupler des approches spatiales et temporelles dont les échelles sont très différentes entre les observations (biologiques) des *Vibrio*, et les observations des paramètres (physiques) environnementaux.

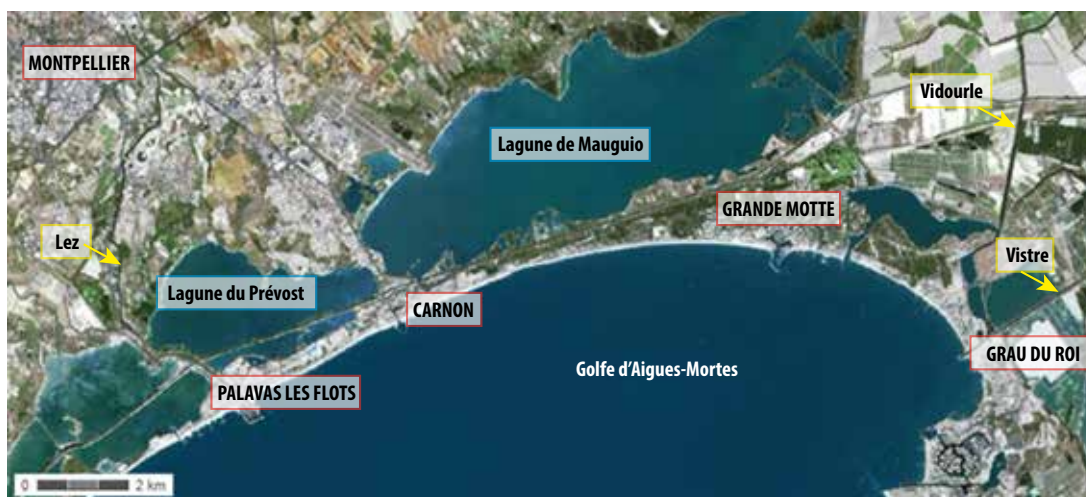
Les toxi-infections alimentaires collectives (TIAC) sont classiquement causées par des bactéries comme *Shigella* et *Salmonella* ou de nombreux virus entériques (hépatite A, norovirus, enterovirus, ...). On constate cependant, partout dans le monde, une émergence de gastro-entérites dues aux *Vibrio*, émergence qui peut s'expliquer par la modification des habitudes alimentaires, le commerce international, l'augmentation du nombre de sujets immunodéprimés, mais aussi par des anomalies liées au réchauffement climatique<sup>2</sup>.

Les dynamiques des *Vibrios* pathogènes humains ont été reliées aux facteurs environnementaux, en particulier à la température et à la salinité, mais aussi au phytoplancton et au zooplancton. Ainsi, des phénomènes climatiques comme *El Niño* ou des anomalies climatiques comme l'augmentation de la température de surface de la mer (SST), ont été reliées à des épidémies de choléra et à la propagation de *V. parahaemolyticus* et *V. vulnificus* dans les systèmes marins côtiers, augmentant le risque de vibrioses. Les anomalies de SST expliquent également les épidémies, suite à la consommation de coquillages, de *V. parahaemolyticus* en Alaska (2004), en Galice (1999), et au Pérou (1997), et l'allongement de la saison estivale explique les infections à *V. vulnificus* aux États-Unis. Des événements météorologiques exceptionnels, tels l'ouragan Irène dans la baie de Chesapeake (États-Unis) en 2011 ou la tempête Xynthia dans le Pertuis Breton (côte Atlantique, France) en 2010 ont été responsables de perturbations des écosystèmes conduisant à des changements dans les concentrations de *V. parahaemolyticus* et *V. vulnificus*, ou l'émergence de souches entéropathogènes de *V. parahaemolyticus*. En Europe, les *Vibrios* pathogènes humains non cholériques sont moins fréquemment associés à des épidémies et le risque d'infection à *V. parahaemolyticus* est considéré comme faible: en France, une centaine de cas d'infection ont été signalés en 2001, suite à la consommation de moules importées d'Irlande. Depuis, seuls des cas sporadiques de vibrioses ont été

1 Équipes ayant participé aux études présentées :  
P. Monfort, M.G. Tournoud, HydroSciences Montpellier, UMR5569 CNRS - IRD - Université de Montpellier ;  
D. Hervio-Heath, Ifremer, Laboratoire Santé, Environnement et Microbiologie, Plouzané ;  
S. Joussaume, Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, UMR8212, CNRS - CEA - UVSQ ;  
H. Rey-Valette, Laboratoire montpellierain d'économie théorique et appliquée, UMR5474, CNRS - INRA - Université de Montpellier.

2 Monfort P., Morand S., Lafaye M., 2014, « Risques microbiologiques et systèmes de surveillance », *Environnement : des milieux et des sociétés*, Collection « Mers et Océans », Monaco et P. Prouzet, eds, ISTE Editions, London, p. 131-160.





**Figure 25**  
Zone d'étude dans les lagunes du Golfe d'Aigues-Mortes.

décrits. Cependant, une analyse des épidémies dans le monde et en Europe conclut qu'une attention particulière devra être portée, dans les prochaines années, à une augmentation des cas en Europe du fait des conséquences du changement climatique.<sup>3</sup>

Le projet d'incubation CLIMVIB (lire encadré p.35) a notamment étudié l'effet, sur la dynamique des *Vibrio* pathogènes humains, des apports brutaux d'eau douce dans les lagunes lors d'épisodes événementiels. Une précédente étude avait montré la présence de *V. parahaemolyticus*, *V. vulnificus* et *V. cholerae* dans l'eau, les sédiments et les coquillages<sup>4</sup> du golfe d'Aigues Mortes, lieu d'étude du projet<sup>5</sup>, caractérisé par de nombreuses lagunes entre les villes du Grau du Roi et de Palavas les Flots. L'hydrologie de ces systèmes lagunaires est complexe, car les lagunes languedociennes communiquent entre elles par le canal du Rhône à Sète et avec la mer au travers de canaux (graus). Par ailleurs, elles sont alimentées ou traversées par des fleuves côtiers (figure 25) dont les débits augmentent rapidement en cas de précipitations : à la fin de l'été et durant l'automne, des pluies intenses sont responsables de crues qui se déversent dans les lagunes provoquant d'importantes variations de la salinité de l'eau. Des échantillonnages multiples ont été pratiqués, y compris après des précipitations, notamment lors des fortes crues de 2011, afin d'évaluer la réponse des concentrations en *Vibrio* à la baisse de la salinité. Ainsi à l'automne 2011, la salinité des sites échantillonnés était autour de 35 ‰ et les concentrations des trois *Vibrio*

étaient comprises entre zéro et deux mille *Vibrio* par litre. De fortes pluies ont provoqué des crues intenses et rapides apportant d'importantes quantités d'eau douce dans les lagunes dans lesquelles la salinité diminua sur quinze jours pour atteindre des valeurs comprises entre 2 et 16 ‰. Les concentrations des trois *Vibrios* augmentèrent alors atteignant des valeurs autour de dix mille *Vibrios* par litre. Les plus fortes concentrations ont été atteintes pour des salinités entre 10 et 20 ‰ pour *V. parahaemolyticus*, entre 10 et 15 ‰ pour *V. vulnificus*, et 5 et 12 ‰ pour *V. cholerae* (figure 26).

Il est difficile de sensibiliser les acteurs à l'émergence des *Vibrio* et aux risques associés, car les cas d'infections ont été, jusqu'à présent, peu nombreux.

### Le genre *Vibrio*

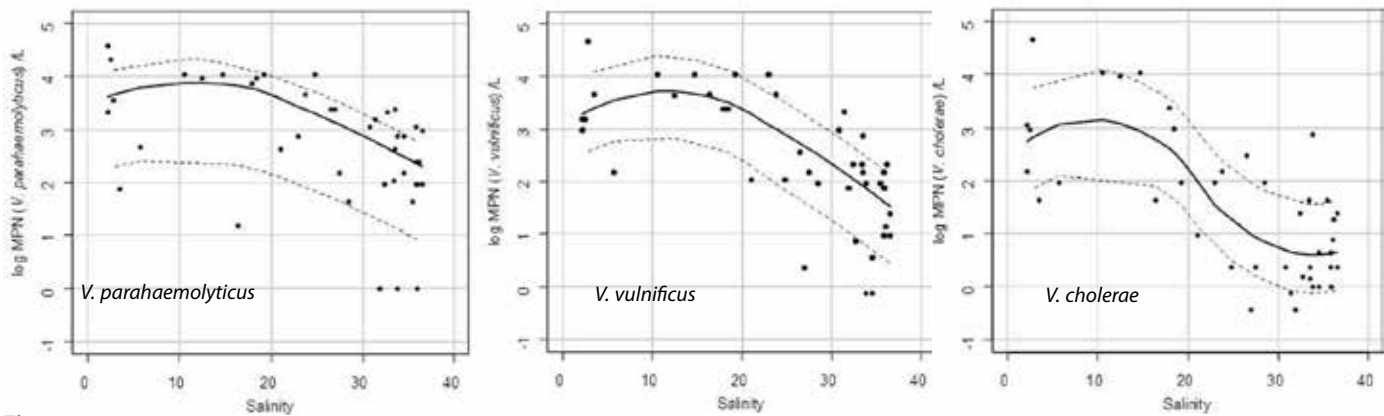
Le genre *Vibrio* est une bactérie autochtone des milieux marins côtiers, présente en période estivale et absente en période hivernale dans les zones tempérées. Parmi les espèces de *Vibrio*, on retrouve des pathogènes d'organismes marins, tels que *V. aesturianus* et *V. splendidus*, pathogènes de l'huître, et des pathogènes humains. *V. cholerae* est responsable du choléra qui affecte trois millions de personnes par an dans le monde avec une mortalité de 2,4 %. *V. parahaemolyticus*, *V. vulnificus* et *V. cholerae* sont des *Vibrios* pathogènes humains non cholériques responsables de nombreux cas de gastro-entérites et d'infections cutanées. Ainsi, *V. parahaemolyticus* est la principale cause de gastro-entérites bactériennes humaines associées à la consommation de produits de mer crus ou peu cuits, en particulier aux États-Unis et au Japon. Aux États-Unis, *V. vulnificus* est responsable de 95 % des décès liés à consommation de produits de mer, avec un taux d'environ 50 % de mortalité. Les *Vibrio* pathogènes humains sont considérés comme des pathogènes émergents transmissibles par l'eau et les produits de la mer, à l'échelle globale\*.

\* Vezzulli L, Colwell RR, Pruzzo C., 2013, « Ocean warming and spread of pathogenic vibrios in the aquatic environment », *Microbial. Ecol.* 65:817-825.

3 Baker-Austin C, Stockley L, Rangdale R, Martinez-Urtaza J., 2010, « Environmental occurrence and clinical impact of *Vibrio vulnificus* and *Vibrio parahaemolyticus*: a European perspective », *Environ. Microbiol. Reports*, 2:7-18.

4 Cantet F, Hervio-Heath D, Caro A, Le Mennec C, Monteil C, Quemere C, Jolivet-Gougeon A, Colwell RR, Monfort P., 2013, « Quantification of *Vibrio parahaemolyticus*, *Vibrio vulnificus* and *Vibrio cholerae* in French Mediterranean coastal lagoons », *Res. Microbiol.*, 164:867-874.

5 Cofinancé(e) par l'Observatoire Homme-Milieux Littoral Méditerranéen.



**Figure 26**  
Concentrations de *V. parahaemolyticus*, *V. vulnificus* et *V. cholerae* versus la salinité mesurée in situ au moment de l'échantillonnage.  
D'après Esteves et al., « Rapid proliferation of *V. parahaemolyticus*, *V. vulnificus* and *V. cholerae* during freshwater flash floods in French Mediterranean coastal lagoons ». Soumis.

En France, par exemple, *V. parahaemolyticus* a causé quelques gastro-entérites, suite à la consommation de coquillages et *V. vulnificus*, la mort d'un pêcheur travaillant dans les lagunes après une infection par blessure. Il est pourtant important d'anticiper, dès aujourd'hui, le problème que poserait, pour la conchyliculture, le risque *Vibrio* dès lors que les concentrations de ces bactéries seraient fortement élevées dans les coquillages. Afin d'évaluer la vulnérabilité des activités et des usages par rapport à une telle contamination émergente, une étude<sup>5</sup> a

été menée sur l'impact économique qu'aurait une interdiction de vente des coquillages produit dans l'Etang de Thau pour cause de présence de *Vibrio*. Différents scénarios d'impact et d'adaptation ont donc été élaborés sur la base des données économiques connues. Le scénario envisagé serait d'interdire les ventes pendant la période été-automne, lorsque la température de l'eau est élevée,



**Figure 27**  
Etang de Thau - parcs à huîtres.  
© Patrick Monfort.

et où les épisodes de fortes pluies provoquent une diminution de la salinité. Il en est ressorti qu'une interdiction de vente de quinze jours conduirait à un manque à gagner de 2,3 millions d'euros, s'il n'y a pas de stratégie de substitution par des importations, cette interdiction venant se cumuler aux difficultés liées aux crises écologiques successives déjà supportées par le secteur. En effet, les ventes de coquillages ont été interdites seize jours par an en moyenne entre 2005 et 2012 du fait de contaminations d'origine fécale (en hiver) et de la présence d'algues toxiques (printemps ou été).

Des événements écologiques et climatiques peuvent provoquer des changements rapides dans la dynamique des *Vibrio* pathogènes pour l'homme. Il est donc important d'entamer une réflexion avec les acteurs (administrations, élus et professionnels) afin de prendre en compte le risque potentiel posé par l'émergence de ces bactéries, dans l'objectif d'anticiper les décisions à prendre pour gérer ce risque. En effet, les critères sanitaires microbiologiques actuels d'interdiction de vente de coquillages sont fondés notamment sur des indicateurs de contamination

fécale qui ne peuvent pas être reliés à la présence des *Vibrio*, qui sont, eux, naturellement présents dans les milieux marins-côtiers. Il est cependant possible d'élaborer un modèle prédictif de la présence de *Vibrio*, relié à des facteurs environnementaux faciles à mesurer en continu comme la température et la salinité qui permettrait d'apporter une aide à la décision. Un tel modèle a été développé aux États-Unis, dans la baie de Chesapeake, où la production de coquillages est très importante<sup>6</sup>. Les informations fournies par ce modèle permettent de gérer la consommation des coquillages lors des périodes à risque. De grands programmes du même type existent pour le golfe du Mexique ou la côte Ouest des États-Unis. Il serait très important que de telles approches soient aussi financées pour les côtes françaises. ■

6 Urquhart EA, Zaitchik BF, Waugh DW, Guikema SD, Del Castillo CE., 2014, « Uncertainty in model predictions of *Vibrio vulnificus* response to climate variability and change: a Chesapeake Bay case study », *PLoS ONE* 9(5): e98256.

# Impacts des facteurs climatiques sur la production des vecteurs du paludisme et stratégies d'adaptation.

Application à la région de Nouna au Burkina-Faso

Cécile Vignolles

Centre national d'études spatiales (CNES)

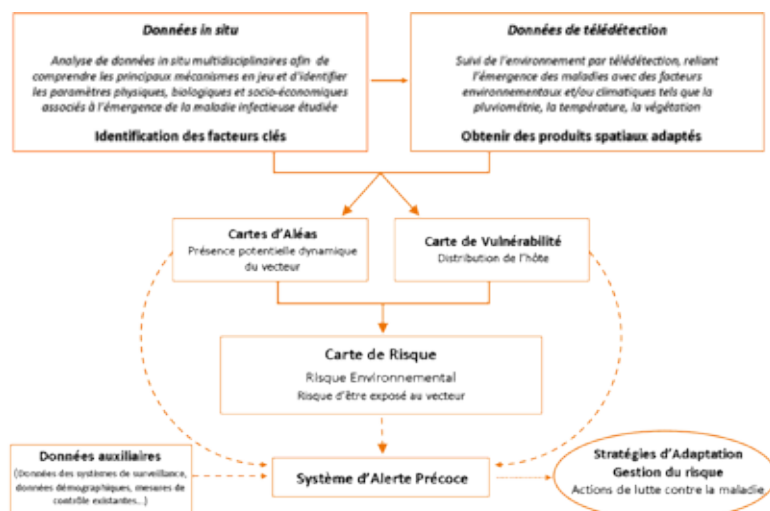
Transmis par l'anophèle, le paludisme concerne 50 % de la population mondiale et est un frein important au développement économique. Au Burkina-Faso, quinze millions de personnes sont considérées comme soumises à ce risque, soit la quasi-totalité de la population. La maladie y est endémique mais dépend de facteurs climatiques et environnementaux. Les acteurs de santé publique, qui mettent en place les actions opérationnelles, ont besoin d'adapter leurs politiques et de cibler leurs mesures de contrôle, en fonction des risques, à une échelle très locale.

Le projet « Impact des facteurs climatiques sur la production des vecteurs du paludisme en zone rurale du Sahel et stratégies d'adaptation » (PALUCIM), coordonné par le Centre national d'études spatiales (CNES) et financé par le Ministère de l'environnement dans le cadre de son programme « Gestion et impacts du changement climatique » (GICC), a été développé dans le but de produire des cartes spatio-temporelles dynamiques du risque vectoriel à l'échelle des villages. Il s'agissait d'étudier l'impact du climat saisonnier et de basse fréquence (tout

comme celui de l'évolution globale) sur le risque paludique, et de mener des recherches sur les stratégies de lutte anti-larvaire, en se fondant sur les échelles très locales. Le projet s'est appuyé, pour cela, sur l'approche de télé-épidémiologie mise en place par le CNES et ses partenaires, qui ont développé une approche conceptuelle des relations climat-environnement-santé et des produits spatiaux adaptés aux besoins des acteurs de la santé. Le projet se fonde sur une approche multidisciplinaire nécessaire pour comprendre les mécanismes des maladies infectieuses. Il s'est aussi appuyé, dès le départ, sur les acteurs locaux pour comprendre leurs besoins, aider les chercheurs à construire des produits adaptés, comprendre les mécanismes à l'œuvre à partir de leur connaissance fine de la maladie et des comportements et assurer le lien avec les populations.

Des échanges interdisciplinaires et des campagnes de terrain ont été nécessaires afin de déterminer les facteurs physiques, biologiques et socio-économiques de la dynamique de la présence et de la localisation du vecteur. A partir de cette connaissance, il a été possible de proposer des produits issus de l'imagerie satellitaire apportant des informations sur l'environnement en lien avec ces facteurs clés et permettant de construire des modèles prédictifs dynamiques.

La zone d'étude était le district de Nouna, situé dans la région de Kossi, au nord-ouest du Burkina-Faso. Son climat est sahélien et des précipitations de huit cents millimètres par an environ s'y abattent de juin à septembre. En 2011 et 2012, de juin à novembre, des protocoles, appliqués dans et autour de dix villages, ont recueilli



**Figure 28**  
Schéma de l'approche conceptuelle de télé-épidémiologie.  
Projet PALUCLIM.

les données entomologiques, météorologiques et d'occupation du sol pour mieux comprendre les mécanismes à l'œuvre puis mesurer la densité larvaire et l'abondance d'anophèles adultes. Ces données de terrain ont permis de construire les cartes vectorielles à partir de l'analyse d'images satellitaires et de préparer la modélisation du risque à partir de ces données entomologiques, environnementales et météorologiques. La résolution des images du satellite SPOT-5 (2,5 m) a permis d'extraire des indices de végétation et d'humidité, et de dresser une carte d'occupation du sol. Les données météorologiques ont été extraites des bases de données RFE (Météo-France), et les données de températures provenaient d'ERA-interim.

En parallèle, une étude a été menée sur le risque de paludisme en fonction de la variabilité du climat à différentes échelles : du saisonnier aux basses fréquences en passant par le changement climatique selon différents scénarios. Cette étude a utilisé le modèle de Craig, qui calcule des indices de conditions favorables à la maladie à partir de la température, de la pluviométrie et de l'humidité relative, et s'est fondée sur les données de 1983 à 2011. Plusieurs études d'épidémiologie ont montré qu'un cumul mensuel de pluie de quatre-vingts millimètres ou plus était très favorable à l'apparition du paludisme, et qu'un cumul inférieur à soixante millimètres y était défavorable. L'indice devient positif si les conditions sont favorables durant trois mois consécutifs. Grâce



**Figure 29**  
Somme des prédictions des densités larvaires d'anophèles pour la période du 31 mai au 24 juillet 2012 sur le village de Goni.  
Projet PALUCLIM.

Densité larvaire  
prédite croissante

↓

■ ■ ■ ■ ■

L'ensemble de ces données a été intégré dans un système d'information géographique après localisation des collections d'eau par GPS. Une régression statistique a été effectuée pour modéliser la localisation des collections d'eau, ce qui a conduit à l'identification de trois indicateurs : le NDPI (*normalised difference pond index*), le NDWI (*normalized difference water index*) et les deux classes de la carte d'occupation des sols (eau et végétation ou eau libre). A partir des indications satellitaires, une carte statique a été établie à partir de ces facteurs environnementaux à un pas de dix mètres, ce qui a permis de prédire la localisation des collections d'eau en cas de précipitations. Une deuxième étude statistique a été conduite pour établir le lien entre les données entomologiques, les données satellitaires et les données météorologiques. Deux variables en sont ressorties – le NDWI et le cumul des pluies durant le mois précédent –, ce qui a permis de construire un modèle de productivité larvaire selon une résolution spatiale de dix mètres.

au modèle, une analyse annuelle des conditions favorables a été dressée à partir de la combinaison des indices mensuels. Il en ressort que, dans la région de Nouna, sur la période 1983-2011, la température et l'humidité relative sont toujours favorables à l'apparition du paludisme et seul le cumul mensuel des précipitations apparaît comme un facteur limitant.

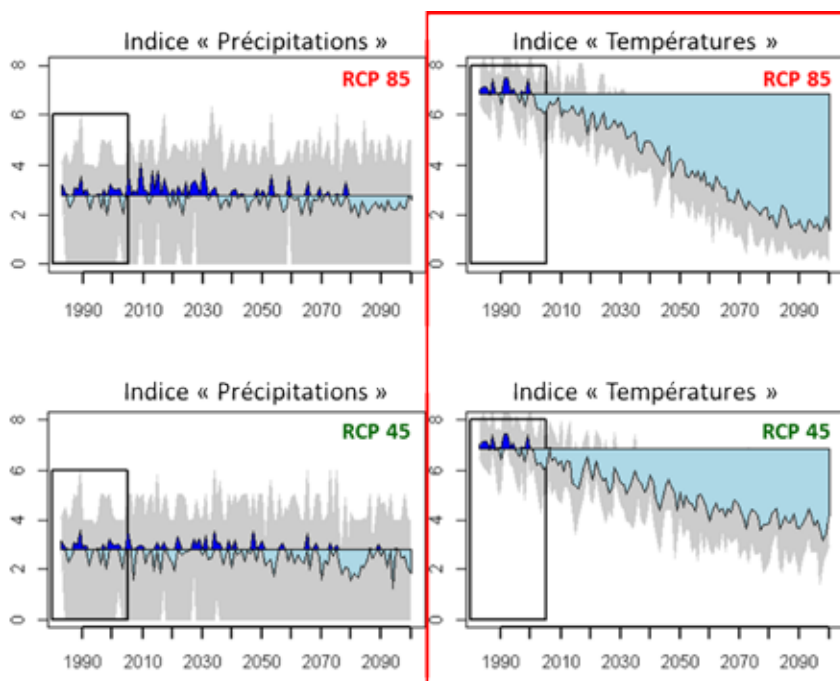
D'autre part, avec un décalage d'un mois, une forte corrélation entre les précipitations de la région de Nouna et l'AMO (l'Oscillation Multi-décennale de l'Atlantique) pour la séquence temporelle juillet-août-septembre a été mise en évidence. Or il a été montré que l'AMO a eu une tendance négative de 1960 à 1995 puis positive de 1995 à aujourd'hui. La tendance négative (positive) de l'AMO tend à réduire (augmenter) les précipitations au Sahel. Cette corrélation est en accord avec l'augmentation de l'indice des conditions de précipitations favorables au développement du paludisme observée après 1995. Pour évaluer la prévisibilité

saisonniers du risque palustre, huit modèles ont été testés (prévision climatologique seule, prévision climatologique différenciée selon les phases de l'AMO, prévision saisonnière du modèle ARPEGE intégrant différents prédicteurs). Il s'est avéré que les meilleures prévisions du dépassement du seuil de quatre-vingts millimètres s'appuyaient sur la prévision climatologique différenciée selon les phases de l'AMO.

Enfin le risque de paludisme, toujours selon le modèle de Craig, a été confronté au changement climatique. Pour cette évaluation, des simulations effectuées dans le cadre de l'exercice de simulations du climat futur à l'échelle globale CMIP-5 ont été utilisées. L'analyse s'est focalisée

région de Nouna. Il faut noter que ce modèle, qui ne tient compte que de facteurs climatiques, ne peut refléter la complexité des mécanismes d'émergence de cette maladie. En revanche, sa simplicité permet un diagnostic de l'évolution des conditions climatiques moyennes favorables à l'existence d'une transmission, toutes choses étant égales par ailleurs et pour peu que le réservoir humain de parasites le permette.

Enfin, un programme de gestion intégrée de lutte antipaludique par contrôle des vecteurs a été développé en s'appuyant sur les cartes de risque de productivité larvaire établies précédemment. Jusqu'ici, les services sanitaires pulvérisaient des insecticides dans les zones d'apparition de la maladie,



**Figure 30**

Évolution moyenne (et dispersion qui l'accompagne) de la valeur annuelle de l'indice des conditions favorables de précipitation et de température au développement du paludisme de 1983 à 2100 pour les deux scénarios de changement climatique retenus : RCP 4.5 et RCP 8.5. Post-2005, les évolutions sont le résultat du scénario de changement climatique RCP 4.5 (bas) et RCP 8.5 (haut). Les parties bleu foncé (bleu clair) des courbes sont pour les périodes au-dessus (en-dessous) de la moyenne qui a été calculée sur la période historique 1983 à 2005. Projet PALUCLIM.

sur deux scénarios de forçage radiatif à savoir le RCP 4.5 et le RCP 8.5. Selon les projections climatiques pour le XXI<sup>ème</sup> siècle et le modèle de Craig, le risque de paludisme devrait sensiblement évoluer. Le changement ne devrait pas concerner le risque lié aux précipitations, où la variabilité du climat semble plus forte que la tendance climatique simulée. En revanche, l'élévation des températures devrait conduire à une réduction notable du risque et deviendrait ainsi le facteur limitant pour le risque de paludisme dans la

et une étude de faisabilité a été menée pour savoir s'il était possible d'utiliser un larvicide bactérien (*Bacillus thuringiensis israelensis*) de façon très ciblée. La nouvelle méthode a été expérimentée sur dix villages, en testant son impact sur la pression entomologique, grâce à des captures d'adultes après des traitements ciblés fondés sur la cartographie des gîtes larvaires issue du modèle. Malheureusement, le larvicide a été livré très tardivement, ce qui a écourté l'intervention et n'a pas permis de mesurer ses résultats. Il a néanmoins été possible de créer un outil d'aide à la décision que les acteurs de la lutte antipaludique locaux ont pu prendre en main et qu'ils ont jugé utile du point de vue opérationnel. Une nouvelle campagne est prévue pour mener une étude sur une centaine de villages afin de valider les résultats et déboucher sur un système opérationnel approprié aux acteurs locaux. Le concept de télé-épidémiologie a par ailleurs été appliqué à la dengue en Guyane et en Martinique, à la fièvre de la vallée du Rift au Sénégal et au paludisme à Dakar. L'ensemble des résultats de ces études est présenté sur le site d'information RedGems<sup>1</sup>. L'étape suivante consistera à intégrer des variables socio-économiques dans les modèles afin de tenir compte des comportements humains. ■

1 <http://www.redgems.eu>



*Changement  
climatique  
et santé :  
comment se préparer ?*



# L'exposition aux pollens et les modifications liées au changement climatique : impacts sur la santé

Samuel Monnier

Réseau national de surveillance aérobiologique (RNSA)

L'aérobiologie rassemble plusieurs disciplines dans le but de suivre le parcours des grains de pollen, qui sont émis et transportés, avant d'entrer éventuellement en contact avec les muqueuses et de provoquer, le cas échéant, des réactions allergiques. Le RNSA a pour objet principal l'étude du contenu de l'air en particules biologiques, à l'origine de risques allergiques, pouvant avoir une incidence sur la santé. Cela se traduit par l'étude du contenu de l'air en pollens et en moisissures ainsi que par le recueil des données cliniques associées. Le RNSA publie également des informations, des cartes de vigilance et des messages de prévention à ce sujet.

Il existe des centaines de stations permanentes de mesure des pollens en Europe, dont soixante-dix en France, auxquelles s'ajoutent, de fin juillet à fin septembre, une dizaine de stations dédiées à l'ambroisie. Les capteurs de pollens sont placés essentiellement sur des toits d'immeubles ; l'air y est aspiré à raison de dix litres par minute, correspondant au rythme moyen de la respiration humaine. Les pollens se déposent sur un tambour adhésif qui



**Figure 31**  
Capteur de pollens.  
© RNSA

effectue sa rotation en sept jours et qui est relevé chaque semaine. Les pollens sont ensuite analysés au laboratoire, par observation microscopique, après coloration. Enfin, afin de reconstituer la charge aérienne par jour et pour les différents pollens par espèce végétale, les différents types de grains de pollens sont dénombrés.

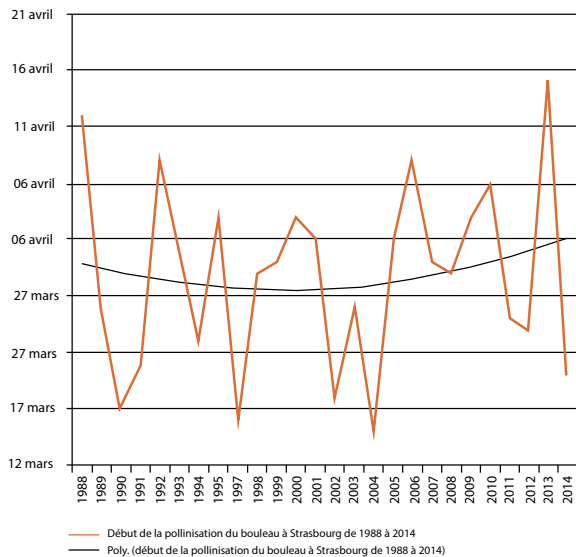
## Le RNSA et la prévention

Le RNSA informe le public notamment grâce à la publication d'un bulletin hebdomadaire sur son site Internet\* : il rapporte la situation de la semaine écoulée en fonction des régions et propose des messages de prévention en fonction des émissions prévues selon les données météorologiques et biologiques. Une carte de vigilance signale les risques chiffrés de 0 à 5 par département. Des cartes nationales, régulièrement mises à jour, présentent, par ailleurs, les niveaux de risques par zone et par espèce. Le site Internet Végétation en ville\*\* apporte, quant à lui, des conseils sur les espèces à éviter et à privilégier lors des plantations dans les parcs et jardins.

\* <http://www.pollens.fr/accueil.php>

\*\* <http://www.vegetation-en-ville.org/>

Les pollens provoquent essentiellement des rhinites, des conjonctivites, de l'asthme, et parfois des urticaires et des eczémas. Le RNSA anime un réseau de médecins sentinelles situés dans un grand nombre de villes françaises. Ces derniers renseignent des bulletins cliniques en fonction des symptômes qu'ils observent, ce qui permet de calculer des index d'impact sanitaire par ville, par région ou pour la France. Ces index sont ensuite corrélés avec l'index pollinique (index d'exposition), ce qui permet de constater que les pics de l'index clinique correspondent à la présence significative de certains pollens dans l'air. Ainsi, les pics cliniques récurrents sont provoqués par les pollens de cyprès dans le sud du pays (février), puis par le bouleau (mars et avril) et par le chêne (avril). Le principal pic est provoqué par les graminées de mai à juillet. Un pic clinique est aussi observé en Rhône-Alpes, où l'ambroisie produit ses pollens, en août et en septembre. Cependant, les périodes exactes d'émission sont décalées, selon les années, en raison des conditions météorologiques. En effet, la biologie des arbres comporte une phase de dormance hivernale déterminante pour le bourgeonnement



**Figure 32**  
Évolution de la date de début de pollinisation du bouleau à Strasbourg entre 1988 et 2014.  
© RNSA

avant le développement du feuillage, le jaunissement et la chute des feuilles. Les plantes ont besoin d'une période d'accumulation de froid (*chilling*), puis d'une période d'accumulation de chaleur (*forcing*) pour bourgeonner, donc pour libérer les pollens. Depuis 2004, les automnes sont plus doux et les sorties d'hiver plus fraîches, ce qui allonge ces deux périodes et décale le début de la saison pollinique. Il en va ainsi, par exemple, à Strasbourg, où le début de la période de concentration supérieure à trente grains par mètre cube a été retardé de quatre jours en moyenne pour le pollen de bouleau.

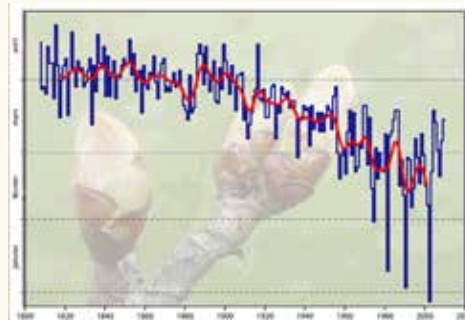
Considérant que la modification de la production des pollens faisait partie des indicateurs des effets du changement climatique sur la santé, Samuel Monnier a coordonné une étude du RNSA à la demande de l'Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique (ONERC). Le bouleau, en raison de son pouvoir allergène et de sa distribution très large sur le territoire français, et les villes d'Amiens, Paris, Strasbourg, Montluçon, Lyon et Toulouse, car ce sont des villes avec des climats différents et des données polliniques fiables, ont été retenus dans le cadre de cette étude. La période de référence du cycle de végétation des bouleaux était juillet-juin, car les quantités émises par les arbres au printemps dépendent de la météorologie depuis l'été précédent. L'étude a débouché sur la création d'un indicateur des quantités de pollen de bouleau produites, dont la croissance de la moyenne mobile sur quatre ans est corrélée à la même moyenne mobile pour les températures annuelles, également en hausse de 1989 à 2014<sup>1</sup>.

1 <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Quantite-annuelle-de-pollens-de.html>

En conclusion, il est certain que le changement climatique provoque la hausse des quantités de pollen produites, par exemple pour le bouleau, et qu'il modifie les dates de floraison et de pollinisation. Il entraîne aussi un allongement de la saison de production pollinique pour certaines espèces, tout comme l'extension de l'aire de répartition d'un ensemble d'espèces. La hausse du taux de CO<sub>2</sub> dans l'air stimule la production de biomasse végétale. Il en résulte, globalement, une augmentation de la quantité de pollen émise et, de ce fait, une plus grande exposition aux pollens allergisants. ■

### Les effets du changement climatique sur la phénologie

Les effets du réchauffement climatique sur la phénologie peuvent être considérés également à partir de la plus longue série phénologique existante à ce jour et suivie depuis 1808 : la date d'apparition de la première feuille des marronniers à Genève. Cette date est de plus en plus précoce, même s'il semble que l'on observe une inversion depuis 2004.



**Figure 33**  
Suivi de la date d'apparition de la première feuille des marronniers à Genève.  
© RNSA

D'autre part, selon les biologistes, une augmentation de 1° C de la température moyenne en France équivaut à un déplacement des espèces végétales de 200 km vers le Nord et/ou à un relèvement de 150 m de leurs altitudes d'implantation. Si la température augmentait de 3,5° C à l'horizon 2100, le chêne vert pourrait se développer au nord d'une ligne Bordeaux-Saint-Etienne dès 2050, et au nord de la Loire en 2100. La répartition de hêtre en France diminuerait de façon drastique et l'olivier pourrait vivre, à cette même date, aux portes du Luxembourg. Ces prévisions ne prennent toutefois pas en compte les critères de photopériode, c'est-à-dire la quantité de lumière dont les espèces ont besoin pour se développer : il faut donc rester très prudent vis-à-vis de ces prévisions qui ne se fondent que sur la température.

# Changement climatique et maladies à transmission vectorielle : que peut-on faire ?

Pietro Ceccato

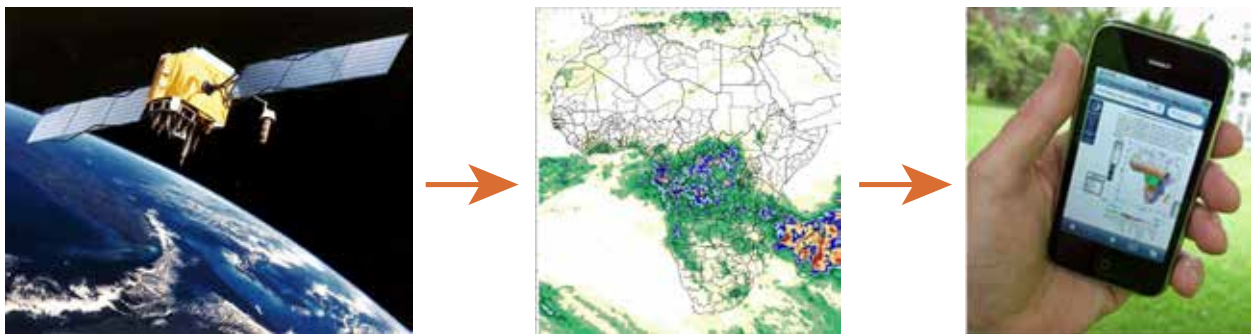
International Research Institute for Climate and Society (IRI) de l'université de Columbia, directeur du Environmental Monitoring Program (EMP)

L'IRI a pour objectif d'anticiper les événements climatiques pour proposer des applications utiles à l'agriculture ou à la santé humaine. Ce programme est aujourd'hui présent en Afrique, en Asie et en Amérique Latine dans le but de prévenir les épidémies, en collaboration notamment avec l'Organisation mondiale de la santé (OMS). Cette dernière souhaite savoir quelles mesures d'adaptation au changement climatique pourraient être mises en place afin de lutter contre les maladies à transmission vectorielle.

Pour cela, il est primordial de comprendre la dynamique du climat et de connaître la variabilité des phénomènes, à partir de données historiques du climat, afin de repérer les anomalies. En Éthiopie, par exemple, on observe, sur la période récente, une sécheresse par décennie, sécheresses dont les causes restent mal connues, bien que l'hypothèse d'un lien avec la température de surface des océans<sup>1</sup> soit à l'étude. Or, dans ce pays, les agriculteurs réagissent à ces sécheresses en construisant des barrages, ce qui favorise le développement de gîtes larvaires et augmente les risques de paludisme.

Il faut ensuite comprendre comment le climat influence les pathologies. En Érythrée par exemple, on constate un pic de paludisme en septembre et octobre dans les zones les plus touchées, un pic au mois de janvier sur la côte Est et une absence de véritable pic du nombre des cas dans les autres zones. Or, la mousson arrose le Sud-Ouest du pays de juin à août, deux mois avant le développement des cas de paludisme. Les zones de montagne sont épargnées du fait de la modération des températures, et la côte Est est souvent touchée par des pluies en décembre. Il est donc possible d'établir un lien entre les précipitations et le développement du paludisme.

Des systèmes d'alerte sont construits sur la base des cartes de transmission et des données apportées par les ministères de la Santé des pays concernés, qui sont tenus de recenser les cas de paludisme : il est alors possible d'évaluer, deux mois à l'avance, le rôle du climat dans le développement d'une éventuelle épidémie. Par ailleurs, le *Seasonal Climate Forecast*, proposé par l'IRI, permet d'évaluer les précipitations six mois en amont, donc d'anticiper les moyens à déployer en révisant régulièrement les



**Figure 34**  
Depuis l'espace jusqu'au smartphone.  
© IRI

1 Bradfield Lyon, 2014, « Seasonal drought in the Greater Horn of Africa and its recent increase during the March–May long rains », *J. Climate*, 27, 7953–7975, doi:10.1175/JCLI-D-13-00459.1.

### Les satellites au service de la prévention

Un des impacts du changement climatique concerne les zones de montagne de l'Afrique de l'Est et du Sud. Les données issues du satellite Modis indiquent que certaines zones d'altitude - supérieure à 2000 m -, jusqu'ici exclues des actions préventives du ministère de la Santé éthiopien, connaissent, en certaines saisons, des températures supérieures à 18° C, favorisant le développement de la malaria. Le ministère de la Santé a donc décidé d'utiliser ces données pour mettre en place des mesures de prévention dans cette région.

Une étude récente\*, consacrée à la province du Gujarat, en Inde, révèle que la création de nouvelles zones d'irrigation favorise le développement de la malaria et qu'une dizaine d'année est nécessaire à la population locale pour mettre en place des actions et s'adapter à la maladie. Les images du satellite LANDSAT permettent de détecter les nouveaux équipements d'irrigation, et donc de déployer les moyens nécessaires.

Dans le Sud Soudan, la mouche responsable de la leishmaniose se reproduit d'avril à juin dans les crevasses des vertisols. Les images satellitaires ont permis de constater que l'insecte ne se reproduit pas en cas d'inondations à cette période, ce qui bloque la transmission de la maladie à l'automne. Les informations sur les inondations permettent donc de prévoir les épidémies. Un programme de même type est en cours sur la méningite.

\* Baezaet al. : "Climate forcing and desert malaria : the effect of irrigation", *Malaria Journal* 2011, 10:190.

### Les multiples facettes de l'IRI

Au-delà de la malaria, l'EMP travaille sur de nombreux dossiers. Il collabore, par exemple, avec l'OMS, John Hargrove\* et l'université Nelson Mandela avec Paul Gwakisa sur la trypanosomiase. Le but est de fournir les données satellites et les outils d'analyse, via l'interface de l'IRI, directement sur des *smartphones* qui peuvent être utilisés par les Masais en tous lieux.

Autres exemples : il prévoit les inondations six jours à l'avance afin que la Fédération internationale des sociétés de la Croix-Rouge et du Croissant Rouge puisse déployer ses moyens le plus précisément possible et intervenir efficacement. Il travaille également sur la prévision des incendies en Indonésie et collabore avec la FAO (Organisations des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture) pour prévoir le développement des criquets Pèlerins.


\* John Hargrove étudie la relation entre le climat et la mouche tsétsé. Il a travaillé sur la façon dont les mouches tsétsé sont attirées par les phéromones du bétail, et a mis au point des pièges à l'acétone afin de les piéger.



**Figure 35**  
John Hargrove sur le terrain, juillet 2014. © Pietro Ceccato

prévisions. Le point le plus délicat à évaluer reste la vulnérabilité, qui dépend de la résistance des moustiques, de l'écologie des milieux, des mouvements et du degré d'immunité des populations, de l'efficacité des mesures mises en place et de l'utilisation des équipements de prévention ; or, ces données sont uniquement disponibles à un niveau local. Le *Seasonal Climate Forecast* et les outils de surveillance des risques environnementaux sont disponibles sur le site Internet de l'IRI<sup>2</sup>. Ces outils permettent de fournir des informations en temps réel concernant les précipitations, les températures, le développement de la végétation et la présence de points d'eau à partir des images satellitaires de la NASA. Il est possible de cliquer sur n'importe quel point de la carte de l'Afrique pour extraire les séries temporelles par période de dix jours et connaître les zones où les pluies sont plus ou moins abondantes que la moyenne.

L'IRI évalue également l'impact, sur la prévalence locale des différentes maladies, des actions de prévention mises en place. Si, malgré les mesures, une augmentation du nombre de cas de paludisme, par exemple, est constatée, des rapprochements effectués avec les séries climatiques permettent de déterminer si la hausse des précipitations et/ou des températures peut en être la cause. En effet, cette recrudescence peut être également due à une résistance des moustiques aux insecticides par exemple. Il faut donc être très vigilant sur le suivi à court terme des risques de maladies afin de cibler, de plus en plus précisément, les mesures à mettre en place, car la population, dans de nombreux pays, n'est pas immune. ■



# Changement climatique et santé : comment se préparer ?

## Synthèse de la table-ronde

Mathilde Pascal

Épidémiologiste, Institut de veille sanitaire (INVS)

Jean-François Toussaint

Responsable du groupe Adaptation et prospective du Haut conseil de la santé publique

Patrick Kinney

Université de Columbia, directeur du *Columbia Climate and Health Program*

Jean-François Guégan

IRD, laboratoire MiVEGEC, professeur associé à l'École des hautes études en santé publique (EHESP)

Pietro Ceccato

*International Research Institute (IRI)* de l'université de Columbia, directeur du *Environmental Monitoring Program (EMP)*.

Introduction par Sylvie Joussaume, directrice du GIS Climat-Environnement-Société.

Plusieurs participants ont également pris la parole depuis la salle.

---

« *L'homme est devenu le principal facteur de modification de l'environnement, donc de sa propre évolution, a rappelé Jean-François Toussaint ; le plus souvent, les actions humaines apportent leurs effets bénéfiques dans un premier temps, mais les effets secondaires néfastes exigent du temps pour se développer, et plus encore pour être étudiés.* »

A l'inverse, les actions de lutte, d'atténuation et d'adaptation au changement climatique ne déploient généralement leurs effets que dans le temps, ce qui peut apparaître un obstacle vis-à-vis des décideurs. Mathilde Pascal préfère néanmoins considérer les enjeux de santé publique comme une opportunité : selon elle, « *il est possible de tirer parti de la prise de conscience, par de nombreux acteurs, de la nécessité de l'adaptation et de l'atténuation, qui sont assez cohérentes entre elles et qui ont le plus souvent des effets bénéfiques pour la santé. C'est le cas pour les villes, qui doivent s'adapter pour éviter des catastrophes telles que les quinze mille morts causées par la canicule de 2003 en France. Cela suppose un renforcement du lien social entre les citoyens, ce qui aura des effets positifs sur la santé mentale, mais aussi une modification de l'urbanisme et des transports, qui implique une amélioration de la qualité de l'air.* » Cependant, alors que la croissance restera certainement atone en Europe durant des décennies, et parce que l'agenda politique est de plus en plus centré sur les questions de court terme, les chercheurs et les responsables de la santé publique devront faire valoir les meilleurs arguments – y compris chiffrés – pour promouvoir leurs travaux, valoriser les éléments qu'ils apportent à la décision publique en matière de prévention des risques, et faire en sorte d'intégrer les questions de santé à l'ordre du jour de la réflexion et de l'action

sur le changement climatique et ceci au-delà de l'action de prévention des événements climatiques extrêmes, autour de laquelle l'action publique a commencé à se structurer.

### RENFORCER LA CONNAISSANCE ET COLLECTER LES DONNÉES

Pour contribuer à l'adaptation des sociétés, la science doit d'abord mieux connaître les déterminants de la santé, afin de mieux identifier et prévoir les impacts de la météorologie et de l'évolution climatique sur les différentes pathologies, et éviter les confusions souvent entretenues par la presse. A cet égard, Jean-François Guégan note que « *les questions de santé ont pris de plus en plus d'importance au fil de l'avancée des travaux du GIS Climat, ce dont il faut se féliciter. Plusieurs des programmes développés au sein du GIS Climat et en dehors ont été présentés aujourd'hui, ce qui témoigne d'une évolution favorable et très créative. Cependant, évaluer le poids du changement climatique dans les inférences causales des problèmes de santé est à la fois un problème épistémologique et une question concrète de recherche.* » Face à des problèmes globaux, une observation globale doit être mise en place : il faut donc se donner les moyens d'une indispensable connaissance de long terme des phénomènes climatiques et des pathologies, ainsi que des problématiques environnementales et socio-économiques, à travers des observatoires à l'échelle mondiale. Les réseaux de l'Institut Pasteur et du Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (CIRAD) pourraient ainsi participer à un futur réseau mondial de centres de surveillance : pour Jean-François Guégan, « *la France a la chance de posséder des observatoires dans*

les pays du Sud : les développer est donc un devoir. » Même si les travaux de l'unité Epidémiologie, systèmes d'information, modélisation (UMR-S 707 INSERM-UPMC) sont remarquables, il faut aussi développer des équipes plus solides en matière de suivi de la dynamique des populations afin de posséder une compréhension des pathologies sur le long terme. Il en va de même pour les recherches en modélisation des dynamiques spatiales, qui supposent le concours de méthodes statistiques spécifiques. Toutes les problématiques doivent donc être enseignées. Globalement, il faut être en mesure de constituer des bases de données très étendues sur l'environnement et la santé. Il est ainsi indispensable de développer l'accès aux données historiques météorologiques et de santé, en les combinant aux données satellitaires. En Afrique, le travail de recueil de ces données s'améliore, y compris grâce aux financements de la Banque mondiale et de Google.

## VERS UN TRAVAIL EN SYNERGIE FACE AU CHANGEMENT GLOBAL

Plusieurs intervenants ont souligné qu'il était essentiel de travailler dans le cadre des changements globaux, donc de relier les questions de santé à la crise de la biodiversité et au changement climatique et de mettre en place des synergies entre chercheurs. Ceci est d'autant plus nécessaire que le lien entre réduction de la biodiversité et santé fait encore l'objet de controverses : de ce point de vue, le travail interdisciplinaire mené par le GIS Climat est exemplaire et doit être généralisé. Étudier ces relations complexes est d'autant plus nécessaire qu'il faut désormais envisager les conséquences indirectes des changements globaux et la perte probable de résilience de nombreux écosystèmes, dont les conséquences sur l'approvisionnement en eau et en aliments pourraient être catastrophiques. Pour Patrick Monfort, CNRS, laboratoire Ecologie des systèmes marins côtiers (ECOSYM), « il faut mettre en place des approches intégratives prenant aussi en compte le rôle des toxiques, ce qui est loin d'être le cas. » Compte tenu du rôle des systèmes de santé et des comportements dans le développement des pathologies, plusieurs participants ont jugé indispensable d'impliquer des chercheurs en sciences humaines dans les programmes de recherche afin de prendre en compte et analyser le rôle joué par les représentations culturelles. En outre, pour mieux comprendre les dynamiques en cause et agir, l'implication de non-scientifiques s'avère un point décisif, comme le montre l'expérience du Royaume-Uni et de la Suisse, où les études environnement-santé sont nombreuses, et où elles regroupent des scientifiques, des élus, des économistes, des organisations non gouvernementales (ONG) et des représentants des habitants. Ainsi, en France, l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME) a intégré des chercheurs en sciences

humaines et sociales dans ses programmes de recherche sur la qualité de l'air ou les déchets. L'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (ANSES), quant à elle, associe des représentants d'ONG et d'associations à ses travaux.

## APPORTER DES OUTILS CONCRETS ET ÉVALUER LES BÉNÉFICES DES POLITIQUES CLIMATIQUES

Les chercheurs doivent répondre à la forte demande des autorités publiques et sanitaires sur le lien entre changement climatique et santé. « En dehors de la recherche fondamentale, les scientifiques doivent faire valoir les résultats applicables de leurs travaux, qui peuvent apporter beaucoup en termes de surveillance sanitaire, de suivi épidémiologique et d'évaluation des méthodes d'adaptation », a souligné Pietro Ceccato. Au cours de cette conférence, plusieurs interventions ont ainsi montré qu'il était souvent possible de proposer des systèmes d'alerte précoce en s'appuyant sur la connaissance fine des mécanismes à l'œuvre et sur les systèmes d'information actuels, y compris sur les images satellitaires. L'utilité de ces systèmes d'alerte pour l'optimisation des moyens des systèmes sanitaires est aussi un moyen de débloquer des fonds pour la recherche scientifique afin de répondre aux demandes sociales : c'est le cas pour l'étude de nombreuses maladies infectieuses ou pour celle des risques liés aux pollens, par exemple. Il est aussi indispensable de valoriser les avantages conjoints de la lutte contre les émissions de gaz à effet de serre et des mesures d'atténuation en termes de santé publique, notamment en matière de qualité de l'air ou de lutte contre les îlots de chaleur urbains. Pour cela, il serait nécessaire d'évaluer les différentes méthodes d'adaptation disponibles, en partant de cas de réussite et d'échec, par exemple en matière de réaction aux vagues de chaleur. Il faudrait aussi considérer les effets sanitaires directs de la hausse des températures en fonction des groupes sociaux, ce qui demeure peu étudié. De façon générale, les études *ex post* doivent aussi être rendues plus évaluatives.

Globalement, toutes les mesures de lutte contre le changement climatique auront des effets sur la santé publique : il faut donc intégrer ces effets dès à présent et construire des analyses coûts-bénéfices exprimées en grandeurs monétaires. Ces analyses sont susceptibles d'attirer l'attention des interlocuteurs de la santé publique et des responsables politiques, car il est indispensable à la société de pouvoir s'appuyer sur des projections et des modèles pour décider collectivement et s'adapter. Ceci étant, les prévisions à échéance rapprochée (horizon 2030) sont délicates à établir du point de vue scientifique, ce qui peut entraîner des difficultés de communication dans le contexte actuel d'action politique à court terme.



Alors qu'il faut agir dès maintenant, Patrick Kinney a souligné que « selon le GIEC, les principaux impacts sanitaires du changement climatique se produiront durant la seconde partie du XXI<sup>ème</sup> siècle. C'est une difficulté, car ces impacts restent très discrets pour le moment, même si quelques signaux commencent à émerger. Dans ces conditions, motiver la société à agir aujourd'hui pour prévenir des risques assez éloignés reste un véritable défi. »

## AGIR SUR LES POLITIQUES À TOUTES LES ÉCHELLES

Pour autant, il existe d'ores et déjà de nombreuses opportunités pour que les décisions collectives prennent en compte les effets du changement climatique sur la santé. Les collectivités territoriales peuvent jouer un rôle pionnier : sous l'impulsion de Mickael Bloomberg (maire de New York de 2002 à 2013), la ville de New-York, fortement exposée, a été très proactive, puisqu'elle a mis en place un plan d'adaptation et de développement soutenable comprenant des échéances à trente et cinquante ans. Des capteurs ont été installés pour suivre les données du métabolisme de la cité en temps réel (températures, précipitations, consommation électrique, flux de transports, etc.) et des plans de végétalisation et d'adaptation des revêtements de voirie ont notamment commencé à être appliqués. En 2006, le plan a mis l'accent sur les questions de santé publique et sur l'intérêt des mesures à prendre en termes d'analyses coûts-bénéfices. Les morts causées par l'ouragan Sandy ont renforcé le sentiment de vulnérabilité de la ville et les investissements nécessaires ont été relancés par le nouveau maire, Bill de Blasio. Mickael Bloomberg travaille actuellement pour répliquer ce type de démarche dans d'autres villes des États-Unis.



**Figure 36**  
Péninsule de Rockaway, Queens, ville de New York : construction d'une promenade plus résistante et mise en place de dunes, de points d'accès, et d'autres structures de protection.  
Source : NYCEDC

En France, de nombreux élus et acteurs de terrain sont conscients de leur rôle en santé publique, à l'exemple de l'association « Élus, santé publique et territoires » : les chercheurs pourraient s'en rapprocher en vulgarisant leurs travaux et leurs



**Figure 37**  
Le troisième PNSE a été présenté en Conseil des Ministres le 12 novembre 2014.

résultats. Au niveau national, la troisième version du Plan national santé et environnement (PNSE) sera adopté en novembre 2014. Francelyne Marano, de l'université Paris Diderot, a rapporté que « le PNSE est un feuille de route importante sur cinq ans en France. Il a été élaboré par des experts et par des parties prenantes au fil de débats successifs. Le comité d'appui scientifique a rendu ses avis sur les différentes actions du plan et a demandé que la relation entre changement climatique, biodiversité et santé soit prise en compte, afin que les ministères responsables de sa mise en œuvre l'intègrent dans leurs actions. Mais les mesures prévues sur le lien entre changement climatique et santé restent timides. » De son côté, l'Organisation mondiale de la santé a organisé une réunion de haut niveau, « Santé et changement climatique », durant trois jours en présence deux cents personnes, dont de nombreux ministres de l'Environnement et de la Santé et d'experts venus de monde entier, même si les Européens y étaient peu nombreux. En

ouverture, la secrétaire générale de l'UNESCO a précisé que le changement climatique n'était pas le problème, mais un symptôme de la consommation déraisonnable des pays riches. Malgré cette forte remise en cause, les participants ont été très intéressés par des débats parfois techniques. Enfin, le sommet climatique des Nations Unies s'est réuni le 23 septembre 2014 : si la question de la santé a joué, jusqu'ici, un rôle minime dans les débats de l'ONU sur le changement climatique, il est probable et souhaitable que celui-ci s'accroisse, car les questions de santé publique ont historiquement joué un rôle fort dans les décisions environnementales. Elles pourraient donc devenir déterminantes pour les choix collectifs à opérer dans la période à venir. ■

ci s'accroisse, car les questions de santé publique ont historiquement joué un rôle fort dans les décisions environnementales. Elles pourraient donc devenir déterminantes pour les choix collectifs à opérer dans la période à venir. ■



# Conclusion

Serge Morand

CNRS-CIRAD, centre d'infectiologie Christophe Mérieux (Laos) et Faculté de médecine tropicale, université Mahidol (Thaïlande)

---

Les travaux présentés dans ces actes démontrent que santé et changement climatique sont liés et sont au cœur des préoccupations de nos sociétés. Le changement climatique a un impact démontré sur notre santé même si son action est parfois complexe, rarement directe, et ne se mesure pas simplement par une augmentation de température moyenne.

Le changement climatique est la partie la plus visible des modifications planétaires globales d'origines anthropiques. Le développement économique, basé sur les énergies fossiles, altère le fonctionnement des écosystèmes et donc des sociétés qui vivent de leurs bons fonctionnements. En effet, il impose ou rend possible des changements considérables en matière d'usage des terres, d'intensification agricole, d'invasions biologiques et de surexploitation des ressources vivantes. La biodiversité est en crise. La sixième extinction en cours des organismes vivants est la conséquence de notre mode de développement énergétique.

C'est l'ensemble de ces changements planétaires qui affecte la santé des humains d'une manière inédite dans l'évolution et dans l'histoire de l'humanité. Si le changement climatique est le révélateur le plus concret des modifications des anthropo-écosystèmes, les risques sanitaires sont révélateurs des modifications des interactions entre les humains, la biodiversité et leur environnement dans ses trois composantes abiotique, biotique et sociale.

En terme de compréhension et de modélisation des risques sanitaires, il y a aussi un intérêt à considérer le changement climatique comme élément central du changement global. La force de la communauté des sciences du climat a été sa capacité à proposer des modèles du changement climatique, modèles rendus possibles par une collaboration avec les économistes qui eux construisent les scénarios

économiques. Les modèles se sont suffisamment sophistiqués au cours des dernières années pour incorporer une représentation des fonctionnements biologiques et écologiques, avec des modèles encore simples d'écosystèmes, et ainsi tenir compte des boucles de rétroaction entre les composantes physiques et biologiques du système Terre.

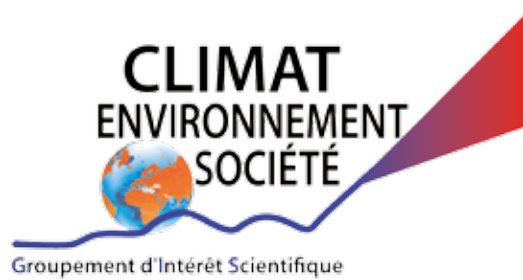
Les modèles de scénarios des risques sanitaires, couplés aux modèles du climat, se sont eux aussi complexifiés et ont gagné en puissance prédictive et heuristique, passant de modèles statistiques (comme les modèles de changement de distribution basés sur le concept de niche environnementale) aux modèles incluant des mécanismes ou des propriétés de fonctionnement (comme les modèles épidémiologiques intégrant la dynamique des vecteurs). La prochaine phase de modélisation devra coupler, à la fois, modèles du changement climatique, modèles du changement de biodiversité (liés notamment au changement d'usage des terres) et modèles de risques sanitaires (infectieux ou non). Une étroite collaboration entre climatologues, écologistes, épidémiologistes et chercheurs en sciences sociales sera nécessaire à leur construction et à leur validation.

Toutefois, le constat que l'on peut faire des crises sanitaires récentes montre que, si les prévisions et les scénarios basés sur l'expertise scientifique sont nécessaires, ils se révèlent insuffisants dans la gestion des crises. Rien ne sert de se préparer au pire si les systèmes de santé publique perdent leur résilience en situation de crise. La résilience des systèmes de santé suppose la confiance entre les différents acteurs de ce système, les politiques en charge de la décision et de l'action, et les citoyens. La santé est un bien public comme la production de connaissance scientifique en est un autre. L'association des citoyens à la gestion de ces deux biens publics est fondamentale afin de préserver les capacités de nos sociétés à faire face aux changements planétaires en cours. ■









UNIVERSITÉ DE  
VERSAILLES  
ST-QUENTIN-EN-YVELINES



UPMC  
UNIVERSITÉ PARIS VI

