



# Moving towards a new discipline - Health ecology

---

## Olivier Plantard

Member of the Steering Committee of AAFCC metaprogram. Research Director – INRA-ONIRIS – Biology, Epidemiology and Risk Analysis in Animal Health Joint Research Unit.

## Laurent Huber

Research Director – INRA-AgroParisTech – Environment and Arable Crops Joint Research Unit.

## Jean-François Guégan

Research Director – CNRS-IRD – Genetics and Evolution of Infectious Diseases Joint Research Unit.

---

Health is subject to a variety of hazards, especially climatic ones. The future management of health requires urgently the development of models that incorporate climatic variables and the characteristics of ecosystems where diseases develop...without forgetting the human aspect!

**C**limate and health are closely linked. Human health, but also plant and animal health are subject to seasonality. If the climate changes, disease seasonality is expected to also change. This raises the question of the consequences of climate change on health. Are they always negative, as certain articles or alarmist reports would lead us to believe? The situation is complex and therefore, naturally, much more nuanced. Clearly, weather extremes, such as heat waves, floods and violent storms will become more intense and more frequent in years to come, which could lead to increased mortality and decreased efficiency of health systems.

However, this impact is still difficult to estimate, as we are unable to predict the frequency of these events, while they will remain rare.

Another expected consequence of climate change on health will concern modified environmental risks, through increased exposure to ultraviolet radiation or atmospheric pollutants such as ozone. Certain effects will be harmful, but others could prove to be positive by prompting, in some places, the disappearance of harmful viruses, bacteria or fungi. Here again, the general impact, of which we understand very little, remains uncertain.

### Outbreak of epidemics

Over the past 20 years, research on the consequences of climate change on health has focused mainly on infectious diseases, due to the multiplicity of factors involved in an epidemic outbreak and to interest in the subject by ecologists, entomologists and zoologists.

As we have just pointed out, the systems are complex because they involve so many interactions. We can begin with the simple biological systems, in which two species interact, the host and the pathogen, developing in a natural ecosystem. We can simplify this further considering the hosts with non-regulating body temperatures - such as plants, insects, reptiles or fish - and who are, consequently, highly susceptible to ambient weather conditions and their changes.

In the case of sudden oak death, an infectious disease caused by a fungus, global warming appears to be responsible for the spatial progression of this disease in some tree species, for example, the red oak in America and the common oak in Europe. Using numerical simulations to model winter survival of the pathogen depending on the temperature of its microhabitat (phloem of infected trees, which is the vascular tissue in plants that conducts elaborate sap), the French National Institute for Agricultural Research (INRA) and Météo-France established that this fungus is expected to gradually move eastward in France, which will result in a potential increased spread of this disease throughout the majority of the territory by the end of the 21<sup>st</sup> century.

Conversely, positive effects of climate change have also been reported. This is the case for a study conducted in the framework of the CLIMATOR project (2007-2010) which focused on three diseases affecting annual crops: the Septoria leaf blotch for wheat, wheat stem rust and Botrytis (gray mold) affecting grape vines – all caused by fungal pathogens. Numerical models taking into account temperature change and air moisture content were used to estimate the duration of the time period over which water is present on the surface of the leaves, especially for wheat. Indeed, infection by the microorganism causing the wheat stem rust requires the presence of liquid water on the leaves for a minimum period, which is dependent on temperature.

For the regions of Dijon and Colmar, simulations indicate that the duration of the periods when infection occurs are expected to decrease by roughly 30 percent by the end of the century, which would lead to lowered risk of stem rust infection of wheat. However, to know the precise duration of infection, we need to consider the influence of climate change on crop dynamics, as well as the effect of predicted earlier

sowing dates, which has not yet been implemented. While these preliminary studies are encouraging, they need to be confirmed and expanded to include other crop fungal diseases.

Regarding animals, the case of the Virginia oyster on the Atlantic coast of North America is particularly demonstrative, confirming the simple and direct link that exists between climate change and the development



*Immunization against influenza, which affects millions of people each winter, helped significantly to reduce the mortality of more vulnerable people.*

### **The paradox of winter mortality**

In France, the 2003 heat wave resulted in the death of roughly 15,000 people, not considering its consequences on the ecosystems and infrastructures. Despite this episode, the mortality rate in temperate regions in the northern hemisphere is surprisingly much higher in winter than during any other season.

According to a review published in 2012 by Patrick Kinney and his colleagues at Columbia University in New York, death rates are generally higher in winter in temperate countries, like Western Europe. In a context of rising global temperatures, this winter mortality rate could increase even further for populations living in hot countries. Cardiovascular or inflammatory complications from respiratory infections, as in the case of flu, are among the possible causes of this still not well understood phenomenon.

Before any generalizations can be made, it should be noted that there are important local and global geographical disparities in winter mortality occurrence. Furthermore, reliable ecological and epidemiological data are scarce although they would be necessary to predict the impacts of climate change on human health, to identify the most vulnerable populations, and to define appropriate preventive and adaptive measures.

of epidemics. In this case, rising surface water temperatures supported the winter survival of the parasite responsible for an infectious disease, perkinsosis, which affects the Virginia oyster: since late 1940's, the range of this disease has progressed more than 500 kilometers to the North.

### The role of temperature

In terms of impacts of climate change, experts agree that mean temperature variations will play an important role in the development of infectious diseases. By influencing metabolism levels of parasites and host organisms, these variations influence the speed microbial agents develop and, as a result, the expansion or reduction of the range of the disease they cause.

Temperature is easier to use than other physical variables to test climate change scenarios. This state variable does not depend on the size or range of the system being considered and experiences much slower fluctuations than rain, a cumulative flux variable. In addition, temperature affects the speed of all biological processes, while rain

affects more specifically, for example, fungal infections for plants and the dispersion of spores and bacteria.

Even if we accept the fact that the frequency of extreme events is going to increase, for example the frequency of long-term rainy periods, the intermittent nature of rain and uncertainty in data collected on a daily scale; make it difficult to determine hourly distribution. This is a challenge for meteorological research as it is occasionally necessary to work with data taken on a time scale shorter than one day. Longer lasting summer droughts present another form of extreme event that could limit, or even stop, the spread of fungal disease, which is transmitted both through the air and within soils, particularly among drought resistant host plants.

### Diseases and their vectors

Now consider the case of human vector-transmitted diseases, such as malaria, dengue and yellow fever. These more complex infectious systems spread from one host to another via vectors - small arthropods that

feed on blood, like for these three diseases spread by mosquitoes. In humans, vector-borne diseases are responsible for close to a quarter of emerging epidemics identified worldwide. As vectors do not regulate their internal temperature, their development is weather-dependent, which consequently affects their survival, fertility and dispersal. Weather conditions also determine the growth of the parasite and, to a lesser extent, the interactions between the vector and its pathogen, and interactions between the vector and the host.

In the current context of climate change, vector-borne diseases are being closely observed by epidemiologists. In the northern hemisphere, the distribution of certain vectors, such as the *Ixodes ricinus* tick, has already changed. This vector for a number of diseases, particularly Lyme disease and tick-borne encephalitis, has progressed to the north of Sweden. In 16 years, the area in which this tick is present has doubled (*see illustration on opposite page*).

Climate change also influences the distribution of "reservoir" species which may host pathogens. This can be seen in North America where the range of the white-footed mouse, the principal breeding reservoir of the bacterium *Borrelia burgdorferi* responsible for Lyme disease, expanded yearly by 10 kilometers to the North.

Since the early 2000s, predicting changes in vector distribution has become an active field of research, due to developments in modeling of ecological niches described by a set of biological parameters and physico-chemical factors. However, while essential for the dissemination of these types of diseases, the presence of a vector is not a solely sufficient condition to cause the development of an epidemic. Even if climate change plays an influential role in the shift of distribution areas for certain vectors, it is difficult to determine precisely how it influences the increased occurrence of



Caused by a fungal pathogen, the wheat stem rust disease manifests on the surface of the leaves as small orange pustules containing spores.

these diseases in regions where they were already present.

### The role of humans

The situation complicates further when we take into account human activities. Bluetongue disease (or also named catarrhal fever), illustrates the complex and sometimes misleading links between climate change and the spread of an epidemic. Bluetongue disease affects ruminants but not humans. This vector-borne disease is caused by a virus, which is itself transmitted by small midges of the *Culicoides* genus. Bluetongue disease epidemics were identified in North Africa where the virus was transmitted by a species of midge (*Culicoides imicola*), whose presence had never been recorded on the European continent. However, in the 1980's and 1990's, this species was detected in its northernmost range ever recorded: in Italy, Sardinia, Corsica and soon after in the South of France. In Europe, it was feared that this epizootic disease (an epidemic outbreak in an animal population) would come from the south. But it was in the Netherlands where the outbreak occurred in August 2006. Over several years, the epidemic spread at a speed of five kilometer per day in all directions, causing important economic damage to sheep and cattle farms across Western Europe: livestock abortions, a decline in milk and meat production, mass vaccination campaigns, trade restrictions, etc.

Due to the location of its origin, the directions of its spread and the responsible virus (BTV8, a different viral form than the one that is present in North Africa), this epidemic presents a spatial dynamic that cannot be directly linked to climate change. Subsequently, it was also observed that the biting midges involved in transmitting BTV8 did not correspond to *Culicoides imicola*, but to other native species, which had previously not been considered as effective vectors. Genetic studies have also established that these midges detected in Southern Europe had been

there for a long time. Thus, the apparent progress of *Culicoides imicola* to Northern Europe can mostly be attributable to augmented efforts in monitoring its presence and tracking its biogeographical distribution.

However, climate change cannot totally be exonerated. A cross-analysis of changing weather conditions in the 1960's and a model describing the population dynamics of vectors and host organisms for this disease showed that the summer of 2006 corresponded to a period of high risk for an outbreak in

climate change on human health, the work of Mark Woolhouse and Sonya Gowtage-Sequeria, from the Centre of Infectious Diseases at the University of Edinburgh, Scotland, is particularly interesting. By compiling a fully comprehensive database, they classified the main causes for the emergence and dispersion of 177 infectious agents that have emerged since the 1960's. Their conclusions dispelled a misperception: they determined that climate change does not play a key role in the emergence of new infectious diseases, but



B. Chaubert - INRA



Lindgren et al., Environmental Health Perspectives, 2000



The tick *Ixodes ricinus* (left), the main vector species for vector-borne diseases affecting humans in Europe, should continue to spread northward in the 21<sup>st</sup> century. In Sweden, its distribution range (white points) doubled between the early 1980's (center image) and 1990's (right image).

Northwestern Europe. And, beyond climatic factors facilitating the transmission of the virus, every indication suggests that its introduction was linked to human activities such as importation (illegal or accidental) of livestock animals or vectors. This example shows how it is sometimes difficult to identify the role of climate changes, or any other types of changes, when human activities play a central role: transporting populations or goods of animal or plant origin, land-use changes, introducing biological control agents, decreasing biodiversity affecting host reservoir species and predators, etc.

### The main causes of outbreaks

Among the multitude of existing scientific and institutional publications who have aimed to highlight the impact of

quite the opposite. In the classification that these epidemiologists have established, it appears that it is the least important factor, at least in 2005 when this study was published. The natural genetic evolution of microorganism comes in fifth place. A good example is the mutation of the Chikungunya virus that occurred in September 2005 on Réunion Island, which triggered a large-scale epidemic that struck more than 300,000 inhabitants of the islands in the Indian Ocean. Demographic, societal and behavioral (particularly high risk practices) changes place second. Using ecological niche models, a recent study on the transmission of dengue fever also showed that its spread was mainly due to high population density, unsanitary conditions and human transportation networks. Finally, in first place, come

changes in land uses and agricultural and agronomical practices. Through their activities, via behaviors and socio-economical organization, humans are the most responsible for the emergence and spread of new pathogens.

The case of the vector-borne diseases transmitted by ticks illustrates the role that changing socio-economic conditions play on the prevalence of certain diseases. The prevalence of tick-borne encephalitis has increased in the Baltic since the early 1990's. Unlike Lyme disease, which has never been the subject of a systematic census, tick-borne encephalitis has been well characterized for over forty years, yielding in high quality data. However, in each of the Baltic countries studied (Lithuania, Latvia, Estonia), significant variability among regions from one year to another has been observed. This suggests that climate change - which occurs relatively homogeneously over large areas - is not the sole cause at work. Sarah Randolph and Dana Sumilo, from the University of Oxford, showed that climate change - with an average annual increase of maximum temperatures (from 10° to 11°C) between 1988

and 1990 - is one of the causal factors, but cannot explain the spatial and temporal heterogeneity in observed cases. They suggest that the resurgence of tick encephalitis observed during this period would be the result of socio-economic transition experienced in the Baltic countries in the early 1990's with the collapse of communism and the former Soviet Union. At that time, many inhabitants of these countries increased their risk of exposure to the vector for this disease by frequenting forests: the poorest populations in search of revenue sources or additional resources collected mushrooms and berries in these areas; but also the wealthiest populations as their leisure activities increased, particularly in the countryside. Abandoned collective farms also lead to changes in land use (lands left fallow, for example), which would have promoted the spread of ticks and so the disease agents they can host in areas where wild and domestic fauna closely interact.

Through all of these examples, we can see that the impact of climate change on infectious diseases is at once complex, highly variable and difficult

to study. On one hand, it involves several actors: pathogens, host reservoir and/or vector species as well as human interventions. On the other hand, several physical variables are acting such as temperature, humidity, wind and precipitation, whose changes are estimated by analyzing their average values as well as their extreme values, and more generally, their variability around the mean during a given period.

All of these parameters are often interdependent and their relationships to the prevalence of infectious diseases are not always linear (i.e., parameters and prevalence do not vary in the same proportions). Relevant spatial and temporal scales to analyze these processes are also highly variable: from a few square centimeters for spore dispersal caused by rain, to the global scale for climate change. This poses serious problems when identifying the relevant level of observation, as certain emerging properties are observable only at higher levels of integration. Such properties will appear at the population or ecosystem level, for example, but are not perceptible at the individual level.

Finally, the systems responsible for disease occurrence are neither fixed nor constant over time, as each actor evolves according to changes in the population genetic composition, prompted by various selection pressures in interactions between hosts and pathogens, or by the environment, for which climate is only one factor.

### Health ecology

This is why a broader framework, combining ecology and evolutionary biology, has been proposed to address these complex issues. In addition to the One Health/One World approach, which is less concerned with the environment, we also have the EcoHealth approach which highlights "sharing responsibilities and coordinated global actions for managing health risks at the animal-human-ecosystem interface levels" and the importance of "strengthening collaborations between human health,

### Principal causes of the emergence of new infectious agents

| Rank | Emergence Factors   | Examples   |
|------|---|--|
| 1    | Changes in land use, agricultural and agronomical practices               | Nipah Virus in Southeast Asia  |
| 2    | Demographic, societal and behavioral changes                              | Pertussis, HIV, syphilis   |
| 3    | Precarious sanitary conditions  | Cholera, Tuberculosis  |
| 4    | Related to hospitals (nosocomial) or health care errors.                  | <i>Staphylococcus aureus</i> , <i>Pseudomonas aeruginosa</i>   |
| 5    | Evolving pathogens (i.e., Chikungunya, antibioresistant forms, mutations) | A/H1N1 virus, H5N1 virus   |
| 6    | Food or water contamination   | <i>E. coli</i> , BSE, <i>Salmonella</i>  |
| 7    | Travel or intercontinental exchanges                                      | Dengue fever, seasonal influenza, H5N1 virus   |
| 8    | Unorganized health and monitoring systems                                 | Central Africa sleeping sickness, tick diseases and tuberculosis in the former USSR                                  |
| 9    | Transportation of goods and animals                                       | Monkeypox Virus, H5N1 virus, <i>Salmonella</i>   |
| 10   | Climate change  | Malaria in East Africa, Dengue fever in Southeast Asia, visceral leishmaniasis in Southern Europe (strong suspicion) |

*This ranking was realized on the basis of 177 infectious agents, responsible for emergent infectious diseases affecting human populations since the 1960's.*

animal health and environmental management". It is about broadening the scope of analysis, traditionally centered on the health of individuals, by considering changes in ecosystems, the influence of planetary changes (particularly climatic) and the loss of biological diversity, with each of their direct and indirect interactions.

Health ecology reflects awareness of shared responsibilities and the need to strengthen actions concerning human, animal and plant health, and the management of the environment. This integrative approach should help to avoid the error of artificially isolating the effects of climate change from other changes caused by humans, which are involved in developing epidemics (land use changes or the introduction of invasive species related to human movement or transportation of goods, for example).

In the animal and plant health domain, the consequences of climate change are still largely unexplored, which explains the launch in 2014 by the French National Agency of Research (ANR) and the European Commission of new research programs. In this framework, increasing resilience of ecosystems, the role of biodiversity and the development of a transdisciplinary and participatory approach (involving researchers, businesses, farmers, managers, etc.) are included among the themes put forward for several major research programs.

### Anticipating the changes

In the plant health domain, the main objectives relate to reducing the use of pesticides and facing global warming. Another important problem has emerged: the feedback of plant health on climate. Strongly affected, or even destroyed, crops or forests will release higher levels of carbon dioxide into the atmosphere, caused by plant dieback and higher mineralization of soil organic matter.

Given the complexity of the considered phenomena, modeling is a crucial



Mosquitoes of the *Aedes* genus spread the Chikungunya virus from one human individual to another by stinging them. This tropical disease is also called "disease of bent humans" because it causes strong joint pain associated with muscle stiffness.

tool. It gives the opportunity to project into the future and create likely scenarios in order to anticipate and better manage expected changes. However, for modeling tools to be relevant, accurate and informative, they require high quality data collected over long timeframes and wide spatial dimensions are needed, which is currently lacking in French research.

For human infectious diseases, for which the pathogen can persist for years or decades in the environment in the absence of its host (such as tetanus, anthrax and legionnaire's disease, for example), it is impossible to definitively conclude to the total absence of the infectious agent in a given location. Therefore, health surveillance does not permit - or makes it very difficult - to respond to questions concerning the influence of climate change in particular,

for this requires a comparison of situations where the disease is present with others where it is absent.

In this context, long-term observatory systems, such as the Long Term Ecological Research Network, are particularly valuable. They should soon be able to integrate epidemiological research related to the effects of climate change on diseases affecting humans, animals and plants, which will improve the accuracy of numerical models.

Lastly, it is crucial that emphasis is given to the fact that identifying and quantifying the effects of global changes on health is a challenge that can only be met if climatologists, epidemiologists, modelers, ecologists, entomologists, microbiologists, parasitologists, immunologists, socioeconomists - among others - work together on one integrated project.

### References

- C. Lepout et J.-F. Guégan, *Les maladies infectieuses émergentes. État de la situation et perspectives*, La Documentation française, 2011.  
 N. Brisson et F. Levrault (éd.), *Le Livre Vert du projet Climator*, ADEME, 2010.  
 K. Smith et J.-F. Guégan, *Changing Geographic Distributions of Human Pathogens, The Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics*, vol. 41, pp. 231-250, 2010.  
 M. Delavière et J.-F. Guégan, *Les effets qualitatifs du changement climatique sur la santé en France - Rapport de Groupe interministériel*, La Documentation française, 2009.  
 K. Lafferty, *The Ecology of Climate Change and Infectious Diseases, Ecology*, vol. 90, pp. 888-900, 2009.

■ POUR LA  
**SCIENCE**

French edition of Scientific American

March 2015

[www.inra.fr](http://www.inra.fr)

**ADAPTATION  
TO CLIMATE CHANGE**



**POUR LA**  
**SCIENCE**

**ADEME**



Agence de l'Environnement  
et de la Maîtrise de l'Énergie



**INRA**  
SCIENCE & IMPACT





# Vers une écologie de la santé

**Olivier Plantard** est directeur de recherche dans l'Unité mixte de recherche INRA - Oniris Biologie, épidémiologie et analyse de risque en santé animale, à Nantes.

**Laurent Huber** est directeur de recherche dans l'Unité mixte de recherche INRA - AgroParisTech Environnement et grandes cultures, à Grignon.

**Jean-François Guégan** est directeur de recherche dans l'UMR IRD-CNRS, Université de Montpellier I et II, Maladies infectieuses et vecteurs : écologie, génétique, évolution et contrôle, et Laboratoire d'Excellence CEBA.

La santé est soumise à divers aléas, notamment climatiques. Pour gérer la santé de demain, il est urgent de concevoir des modèles intégrant les variables du climat, les caractéristiques des écosystèmes où se développent les maladies... sans oublier l'être humain !

**C**limat et santé sont liés. La santé humaine, mais aussi la santé végétale ou la santé animale sont soumises à la saisonnalité. Si le climat change, la saisonnalité des maladies devrait également évoluer. Dès lors, se pose la question des conséquences sanitaires du changement climatique. Sont-elles toujours négatives, comme certains articles ou reportages alarmistes le laissent penser ? La situation est complexe, donc forcément plus nuancée. Certes, des événements météorologiques extrêmes, tels que les canicules, les inondations ou les tempêtes violentes, se feront plus intenses et plus fréquents dans les années à venir, et pourraient entraîner une hausse de la mortalité et une baisse de l'efficacité des systèmes sanitaires.

Néanmoins, cet impact reste difficile à estimer, car on ne sait pas prévoir la fréquence de ces événements qui resteront rares. Une autre conséquence attendue du changement climatique sur la santé concerne la modification des risques environnementaux, *via* une exposition accrue aux rayonnements ultraviolets ou à des polluants atmosphériques, tels que l'ozone. Certains effets seront néfastes, mais

d'autres pourraient se révéler positifs en faisant disparaître, par endroits, des virus, des bactéries ou des champignons parasites. Là encore, l'impact général, peu étudié, demeure incertain.

## Déclenchement des épidémies

Depuis une vingtaine d'années, les recherches concernant les conséquences sanitaires du changement climatique ont porté principalement sur les maladies infectieuses, du fait de la multiplicité des facteurs intervenant dans le déclenchement d'une épidémie et de l'intérêt que les écologues, entomologistes et zoologistes manifestent pour ce sujet.

Comme nous l'avons souligné, les systèmes sont complexes, car ils présentent de nombreuses interactions. Commençons par des systèmes biologiques simples, où deux espèces en interaction, l'hôte et l'agent pathogène, évoluent dans un écosystème naturel. Simplifions encore en considérant les hôtes dont la température corporelle n'est pas régulée – à l'instar des plantes, insectes, reptiles ou poissons –, et qui sont, par conséquent, très sensibles aux conditions météorologiques ambiantes et à leur évolution.

Dans le cas de l'encre du chêne, maladie infectieuse due à un champignon parasite, le réchauffement climatique semble bien responsable de la progression de cette maladie chez certaines espèces d'arbres, par exemple le chêne rouge d'Amérique et le chêne pédonculé. Au moyen de simulations numériques, permettant de modéliser la survie hivernale de l'agent pathogène en fonction de la température de son microhabitat (le phloème des arbres infectés, c'est-à-dire le tissu qui conduit un type de sève), des chercheurs de l'INRA et de Météo-France ont établi que ce champignon devrait se déplacer progressivement vers l'Est de la France, entraînant un accroissement du potentiel d'expansion de cette maladie sur la majorité du territoire d'ici la fin du XXI<sup>e</sup> siècle.

Au contraire, d'autres travaux ont mis au jour une influence favorable du changement climatique sur la santé des plantes. C'est le cas d'une étude réalisée dans le cadre du projet CLIMATOR (2007-2010) sur trois maladies affectant des cultures annuelles : la septoriose du blé, la rouille brune du blé et le botrytis de la vigne – causées par des champignons pathogènes également. Des modèles numériques prenant en compte l'évolution de la température et du taux d'humidité de l'air ont permis d'estimer la durée au cours de laquelle de l'eau est présente à la surface des feuilles de blé, notamment. En effet, l'infection par le micro-organisme responsable de la maladie de la rouille brune requiert la présence d'eau liquide sur les feuilles pendant une durée minimale qui dépend de la température.

Pour les régions de Dijon et de Colmar, les simulations indiquent que la durée des périodes où l'infection sévit devrait diminuer d'environ 30 pour cent d'ici la fin du siècle, ce qui conduirait à une baisse des risques d'infection du blé par les spores de la rouille brune. Toutefois, pour connaître précisément la durée des infections, il faudrait considérer aussi l'influence du changement climatique sur la dynamique

des cultures, ainsi que l'avancée prévisible des dates de semis, ce qui n'a pas encore été réalisé. Même si ces travaux préliminaires sont encourageants, ils demandent à être confortés et élargis à d'autres maladies fongiques dont souffrent les cultures.

Citons maintenant un exemple chez l'animal, l'huître de Virginie, implantée sur les côtes atlantiques d'Amérique du Nord. Son évolution confirme le lien simple et direct entre le changement climatique et le développement d'une épidémie. Ainsi, l'élévation de la température des eaux de surface a favorisé la survie hivernale d'un

parasite responsable d'une maladie infectieuse, la perkinsose : depuis la fin des années 1940, l'aire de répartition de cette maladie a progressé de plus de 500 kilomètres vers le Nord.

### Le rôle de la température

En termes d'impact du changement climatique, les experts s'accordent à dire que les variations de température joueront un rôle important sur le développement des maladies infectieuses. En influant sur le métabolisme des parasites et des organismes hôtes, ces variations conditionnent les vitesses de développement et, par conséquent,



*Les campagnes de vaccination contre la grippe, qui touche plusieurs millions de Français chaque hiver, ont permis de diminuer notablement le nombre de décès de personnes fragiles.*

### Le paradoxe de la mortalité hivernale

En France, la canicule de 2003 a entraîné la mort d'environ 15 000 personnes, sans compter ses conséquences sur les écosystèmes et les infrastructures. Malgré cet épisode, le taux de mortalité dans les régions tempérées de l'hémisphère Nord est beaucoup plus élevé en hiver que durant toute autre saison.

Selon une revue réalisée en 2012 par Patrick Kinney et ses collègues de l'Université Columbia, à New York, on meurt généralement plus en hiver dans les pays tempérés, telle la France. Dans un contexte de hausse globale des températures, cette mortalité hivernale pourrait même augmenter au sein des populations qui vivent dans les pays chauds. Pour expliquer ces effets encore mal compris, on évoque, tour à tour, des complications cardio-vasculaires, mais aussi inflammatoires après des infections respiratoires, comme c'est le cas avec la grippe.

Avant toute généralisation, précisons qu'il existe d'importantes disparités géographiques globales et locales dans les manifestations de cette mortalité hivernale. Par ailleurs, les chercheurs ne disposent que d'un petit nombre de données écologiques et épidémiologiques fiables, qui seraient pourtant indispensables pour prévoir les conséquences sanitaires du changement climatique, identifier les populations les plus vulnérables et définir les mesures de prévention et d'adaptation les mieux adaptées.

interviennent sur l'expansion ou la diminution des aires de répartition.

La température est plus facile à utiliser que d'autres variables physiques pour tester des scénarios de changement climatique. Cette variable d'état ne dépend pas de l'étendue du système considéré, et connaît des fluctuations beaucoup moins rapides que celles de la pluie, variable de flux cumulative. Par ailleurs, la température influe sur la vitesse de tout processus biologique, alors que la pluie agit plus spécifiquement, par exemple, sur l'infection fon-

### Les maladies et leurs vecteurs

Examinons à présent le cas des maladies à transmission vectorielle, telles que le paludisme, la dengue ou la fièvre jaune. Ces systèmes infectieux plus complexes se propagent d'un individu hôte à un autre par l'intermédiaire de vecteurs, de petits arthropodes qui se nourrissent de sang : moustiques, moucheron, poux, punaises, tiques, etc. Chez l'homme, les maladies vectorielles sont responsables de près d'un quart des épidémies émergentes recensées dans le monde. Puisque les vecteurs ne régulent pas

Le changement climatique influe aussi sur la répartition des espèces « réservoirs » qui hébergent l'agent pathogène. Ainsi, en Amérique du Nord, l'aire de répartition de la souris à pattes blanches, principal réservoir de la bactérie *Borrelia burgdorferi* responsable de la maladie de Lyme, a progressé de 10 kilomètres par an vers le Nord.

Depuis les années 2000, la prédiction des changements d'aires de répartition des vecteurs est devenue un champ de recherche particulièrement actif, grâce à l'essor de la modélisation des niches écologiques, décrites par un ensemble de paramètres biologiques et physico-chimiques. Cependant, bien que la présence d'un vecteur soit indispensable à la diffusion de ce type de maladies, elle ne constitue pas une condition suffisante pour qu'une épidémie se développe. Même si le rôle direct du changement climatique est en cause dans les modifications des aires de répartition de certains vecteurs, il est difficile de mettre en évidence son rôle dans l'augmentation de la prévalence de ces maladies dans des régions où elles étaient déjà présentes.



Causée par un champignon pathogène, la maladie de la rouille brune du blé se manifeste à la surface des feuilles par de petites pustules orangées contenant des spores.

gique des plantes et la dispersion des spores et bactéries.

Même s'il est admis que la fréquence des événements extrêmes va augmenter, par exemple la fréquence des épisodes pluvieux de longue durée, le caractère intermittent de la pluie et les incertitudes sur les données à l'échelle de la journée rendent difficile l'obtention d'une répartition de la pluie par heure. C'est un enjeu pour la recherche météorologique, car il nous faut parfois ces données à une échelle temporelle très inférieure à la journée. Les sécheresses estivales plus longues constituent d'autres événements extrêmes, qui pourraient limiter, voire arrêter, la progression de mycoses fongiques transmises par l'air ou dans le sol, notamment chez les plantes-hôtes qui résisteront à la sécheresse.

leur température interne, les conditions météorologiques conditionnent leur développement, leur survie, leur fécondité et leur dispersion. Elles déterminent aussi la croissance du parasite et, dans une moindre mesure, les interactions du vecteur et de son agent pathogène, ainsi que du vecteur et de l'hôte.

Dans le contexte actuel du changement climatique, les maladies vectorielles sont observées avec attention par les épidémiologistes. Dans l'hémisphère Nord, la répartition de certains vecteurs, telle la tique *Ixodes ricinus*, est d'ores et déjà modifiée. Vectrice de nombreuses maladies, la maladie de Lyme et l'encéphalite à tique notamment, cette tique a progressé vers le Nord de la Suède. En 16 ans, l'aire de la zone où elle est présente a doublé (voir l'illustration page ci-contre).

### Le rôle de l'homme

La situation se complique encore quand on tient compte des activités humaines. La fièvre catarrhale ovine, ou maladie de la langue bleue, illustre les liens complexes et parfois trompeurs entre le changement climatique et la propagation d'une épidémie. La fièvre catarrhale touche les ruminants, mais pas l'homme. Cette maladie vectorielle est causée par un virus, qui est lui-même transmis par des petits moucheron piqueurs du genre *Culicoides*. Des épidémies de fièvre catarrhale étaient recensées en Afrique du Nord, où le virus était véhiculé par une variété de moucheron (*Culicoides imicola*), dont la présence n'avait jamais été enregistrée sur le continent européen.

Or, dans les années 1980 et 1990, cette espèce a été détectée de plus en plus au Nord de son aire de répartition connue : en Italie, Sardaigne,

Corse, puis dans le Sud de la France. En Europe, on redoutait ainsi qu'une épizootie (épidémie animale) n'arrive par le Sud. Mais c'est aux Pays-Bas qu'elle s'est finalement manifestée, en août 2006. En quelques années, l'épizootie s'est propagée à une vitesse de cinq kilomètres par jour dans toutes les directions, causant des dommages économiques importants dans les élevages ovins et bovins d'Europe de l'Ouest : avortements, baisse de la production de lait et de viande, campagnes massives de vaccination, restriction des échanges commerciaux, etc.

En raison de la localisation du foyer d'origine, des directions qu'elle a suivies et du virus qui l'a causée (BTV8, une forme virale différente de celle présente en Afrique du Nord), cette épizootie présente une dynamique qui ne peut être directement liée au changement climatique. Par la suite, on s'est d'ailleurs aperçu que les moucheron impliqués dans la transmission du BTV8 correspondaient non pas à *Culicoides imicola*, mais à d'autres espèces, qui auparavant n'étaient pas considérées comme des vecteurs efficaces. Des études génétiques ont également établi que les moucheron détectés dans le Sud de l'Europe s'y trouvaient depuis longtemps. Ainsi, l'apparente progression des *Culicoides* vers le Nord de l'Europe est surtout imputable à une augmentation des efforts de surveillance et de recherche pour les trouver, c'est-à-dire à une meilleure connaissance de leur répartition géographique.

Le changement climatique n'est pas totalement hors de cause pour autant. Une analyse croisée de l'évolution des conditions climatiques depuis les années 1960 et d'un modèle décrivant la dynamique des vecteurs et des organismes hôtes de cette maladie a montré que l'été 2006 correspondait à une période de risque maximal pour le déclenchement d'une épidémie dans le Nord-Ouest de l'Europe. Et, au-delà des facteurs climatiques qui ont favorisé la transmission du virus, tout porte à croire que son introduction est

liée aux activités humaines telles que l'importation (illégale ou accidentelle) d'animaux ou de vecteurs. Cet exemple montre à quel point il est parfois difficile de séparer la part du changement climatique et celle d'autres évolutions où les activités humaines occupent un rôle central : transferts de populations ou de marchandises d'origines animale et végétale, changement d'usage des sols, auxiliaires de culture qui détruisent les ravageurs, baisse de la biodiversité touchant les espèces réservoirs et les prédateurs, etc.

raît comme le dernier facteur, du moins en 2005, date où ce travail a été publié !

L'évolution génétique naturelle des micro-organismes y occupe la cinquième place. À titre d'exemple, rappelons que la mutation du virus du Chikungunya, qui s'est produite en septembre 2005 à La Réunion, a déclenché une épidémie de grande envergure qui a frappé plus de 300 000 habitants des îles de l'océan Indien. Les changements démographiques, sociétaux et comportementaux (les pratiques à risque, notamment) figurent à la deuxième place.



B. Chauvet - INRA



Lindgren et al., Environmental Health Perspectives, 2000



La tique *Ixodes ricinus* (à gauche), principale espèce vectrice de maladies vectorielles chez l'homme en Europe, devrait continuer à s'étendre au cours du XXI<sup>e</sup> siècle. En Suède, son aire de répartition (points blancs) a doublé entre les années 1980 (au centre) et 1990 (à droite).

### Les principales causes d'émergence

Parmi la multitude de publications scientifiques et institutionnelles qui se sont efforcées de mettre en lumière l'impact du changement climatique sur la santé humaine, les travaux de Mark Woolhouse et de Sonya Gowtage-Sequeria, du Centre des maladies infectieuses de l'Université d'Édimbourg, en Écosse, sont particulièrement intéressants. En réunissant une base de données très complète, ils ont classé les principales causes d'émergence et de dispersion de 177 agents infectieux apparus depuis les années 1960. Leurs conclusions battent en brèche une idée reçue : le changement climatique ne joue pas un rôle déterminant dans l'émergence de nouvelles maladies infectieuses, bien au contraire. Dans le classement que ces épidémiologistes ont établi, il appa-

En se fondant sur des modèles de niches écologiques, une étude récente sur la transmission de la dengue a ainsi montré que son expansion était principalement due aux densités élevées de population, aux conditions d'insalubrité ainsi qu'aux réseaux de transport humains. Enfin, au premier rang, se situent les changements d'usage des sols ainsi que les pratiques agricoles et agronomiques. Par ses activités, par ses comportements et par ses modes d'organisation socio-économique, l'homme est le principal responsable de l'apparition et de l'expansion des nouveaux agents pathogènes.

Pour illustrer le rôle des changements des conditions socio-économiques sur la prévalence de certaines pathologies, revenons sur le cas des maladies vectorielles transmises par les tiques.

La prévalence de l'encéphalite à tique a augmenté dans les pays baltes à partir du début des années 1990. Contrairement à la maladie de Lyme, qui n'a jamais fait l'objet d'un recensement systématique, l'encéphalite à tique a été très bien répertoriée depuis une quarantaine d'années, offrant ainsi des données de qualité. Or, dans chacun des pays baltes étudiés (Lituanie, Lettonie, Estonie), on a observé une grande hétérogénéité des variations de la prévalence d'une année à l'autre entre cantons. Cela suggère que le changement climatique – qui se produit de façon relativement homogène sur de vastes zones – n'est pas le seul en cause.

Sarah Randolph et Dana Sumilo, de l'Université d'Oxford, ont montré que le changement climatique – avec une augmentation de la moyenne annuelle des températures maximales (passant de 10 à 11°C) entre 1988 et 1990 – constitue un des facteurs en cause, mais ne peut pas expliquer l'hétérogénéité observée dans l'espace et dans le temps. Elles avancent l'hypothèse suivante : la recrudescence de l'encéphalite à tique observée durant cette période résulterait de la transition

socio-économique que les pays baltes ont connue au début des années 1990 en sortant du communisme.

À cette époque, de nombreux habitants de ces pays ont augmenté leur risque d'exposition au vecteur de la maladie en fréquentant davantage les forêts : les populations les plus pauvres, en s'efforçant de trouver des revenus ou des ressources complémentaires *via* la cueillette de champignons et de baies ; mais aussi les plus riches, en raison d'un accès accru aux activités de loisir, dans les campagnes notamment. L'abandon des fermes collectives a aussi entraîné des modifications dans l'utilisation des sols (des mises en jachère, par exemple), qui auraient favorisé la propagation de ces maladies où les faunes sauvages et domestiques interagissent étroitement.

À travers tous ces exemples, on mesure combien l'impact du changement climatique sur les maladies infectieuses est complexe, variable et difficile à étudier. D'une part, il est lié à de multiples acteurs : agents pathogènes, organismes hôtes, vecteurs de transmission, espèces réservoirs et interventions humaines. D'autre part, il est soumis à plusieurs variables physiques

telles que la température, l'humidité de l'air, le vent et les précipitations, dont l'évolution doit être estimée par l'analyse de leurs valeurs moyennes, mais aussi de leurs valeurs extrêmes, et plus généralement de leur variabilité durant telle ou telle période.

Tous ces paramètres sont souvent interdépendants, et les relations qu'ils entretiennent avec la prévalence des maladies infectieuses ne sont pas toujours linéaires (les paramètres et la prévalence ne varient pas dans les mêmes proportions). Les échelles spatiales et temporelles permettant d'analyser ces maladies sont par ailleurs très variables : de quelques centimètres carrés pour la dispersion des spores par la pluie, à une échelle planétaire quand il s'agit de l'évolution du climat global. Cela pose d'épineux problèmes de changement d'échelles, car certaines propriétés dites émergentes ne sont observables qu'à des niveaux d'intégration supérieurs. Ces propriétés n'apparaissent que si l'on se place à l'échelle des populations ou à celle des écosystèmes, par exemple, mais ne sont pas perceptibles quand on étudie les individus séparément. Enfin, les systèmes responsables de maladies ne sont ni fixes ni constants au cours du temps, car chacun des acteurs évolue en raison des modifications de la composition génétique des populations sous l'effet des différentes pressions de sélection exercées par les interactions des hôtes avec les agents pathogènes, ou par l'environnement, dont une des facettes est le climat.

### L'écologie de la santé

C'est pourquoi un cadre plus large, associant écologie et biologie évolutive, a été proposé pour étudier ces questions complexes. À côté de l'approche *One Health/One World*, prenant peu en compte l'environnement, citons l'approche *EcoHealth* qui met en avant « le partage des responsabilités et la coordination des actions globales pour gérer les risques sanitaires aux interfaces animal-homme-écosystèmes » et l'im-

### Principales causes d'apparition des nouveaux agents infectieux

| Rang | Facteurs d'émergence   | Exemples   |
|------|--|--|
| 1    | Changements d'usage des sols, pratiques agricoles et agronomiques          | Virus Nipah en Asie du Sud-Est, ESB  |
| 2    | Changements démographiques, sociétaux et comportementaux                   | Coqueluche, VIH, syphilis  |
| 3    | Précarité des conditions sanitaires  | Choléra, tuberculose   |
| 4    | Liés à l'hôpital (nosocomiaux) ou à des erreurs de soins et de pratiques   | <i>Staphylococcus aureus</i> , <i>Pseudomonas aeruginosa</i>   |
| 5    | Évolution des agents pathogènes (Chikungunya, antibiotiques, mutations...) | A/H1N1, H5N1   |
| 6    | Contamination par les aliments ou l'eau                                    | <i>E. coli</i> , ESB, <i>Salmonella</i>  |
| 7    | Voyages et échanges intercontinentaux                                      | Dengue, grippe saisonnière, H5N1   |
| 8    | Désorganisation des systèmes de santé et de surveillance                   | Maladie du sommeil en Afrique centrale, maladies à tiques et tuberculose, ex-URSS  |
| 9    | Transports de biens et d'animaux   | Virus <i>Monkeypox</i> , H5N1, <i>Salmonella</i> ...   |
| 10   | Changement climatique  | Paludisme en Afrique de l'Est, dengue en Asie du Sud-Est, leishmaniose viscérale dans le Sud de l'Europe (forte suspicion) |

Ce classement a été réalisé à partir de 177 agents pathogènes responsables de maladies infectieuses émergentes touchant les populations humaines depuis les années 1960

portance du « renforcement des collaborations entre santé humaine, santé animale et gestion de l'environnement ». Il s'agit d'élargir le champ d'analyse, traditionnellement centré sur la santé des individus, en considérant les modifications des écosystèmes, l'influence des changements planétaires (climatiques notamment) et la perte de diversité biologique, avec toutes leurs interactions directes et indirectes.

L'écologie de la santé traduit une prise de conscience du partage des responsabilités et de la nécessité de renforcer les actions communes concernant la santé humaine, la santé animale et végétale, et la gestion de l'environnement. Cette approche intégrative permet d'éviter l'erreur qui consiste à isoler artificiellement l'effet du changement climatique d'autres modifications dues à l'homme, et impliquées elles aussi dans le développement d'épidémies (changement d'utilisation des sols, introduction d'espèces invasives liée aux déplacements humains ou au transport de marchandises, par exemple).

Dans le domaine animal et le domaine végétal, les conséquences sanitaires du changement climatique restent largement inexplorées, ce qui explique le lancement, début 2014, de nouveaux programmes de recherche par l'Agence nationale de la recherche et la Commission européenne. Dans ce cadre, l'augmentation de la résilience des écosystèmes, le rôle de la biodiversité et le développement d'une approche transdisciplinaire et participative (associant chercheurs, entreprises, agriculteurs, gestionnaires, etc.) figurent parmi les thématiques mises en avant dans plusieurs grands programmes de recherche.

### Anticiper les évolutions

Dans le domaine végétal en particulier, les objectifs majeurs ont trait à la réduction de l'usage des pesticides et à la préservation des cultures face au réchauffement climatique. Une autre problématique importante a émergé : les rétroactions de la santé des plantes sur le climat. Une culture fortement at-

teinte, voire détruite, par une épidémie importante émet davantage de dioxyde de carbone dans l'atmosphère, à cause du dépérissement des plantes et d'une minéralisation plus forte des matières organiques contenues dans les sols.

Étant donné la complexité des phénomènes considérés, la modélisation représente un outil incontournable.

surveillance sanitaire ne permet pas – ou très difficilement – de répondre aux interrogations sur l'influence du changement climatique en particulier, car cela nécessite de comparer des situations où la maladie est présente et d'autres où elle est absente.

Les dispositifs de suivis de longue durée, du type *Long Term Ecological*



Les moustiques du genre *Aedes* propagent le virus du chikungunya d'un individu à un autre en les piquant. Cette maladie tropicale est également nommée « maladie de l'homme courbé », car elle provoque de très fortes douleurs articulaires associées à une raideur musculaire.

Elle permet de se projeter dans le futur et d'établir des scénarios susceptibles de gérer et d'anticiper au mieux les évolutions attendues. Mais, pour être pertinents, précis et informatifs, les modèles doivent pouvoir se fonder sur des données de qualité et de longues séries temporelles et spatiales, ce qui fait actuellement défaut dans la recherche française, qu'elle ait lieu en France ou dans les pays tropicaux.

Pour les maladies infectieuses humaines, telles que le tétanos, l'anthrax et la légionellose, où l'agent pathogène peut persister dans l'environnement en l'absence de son hôte, il est impossible de conclure de façon certaine à l'absence totale de l'agent infectieux dans un endroit donné. Dès lors, la

*Research Network* (réseau de recherche écologique sur le long terme) sont particulièrement précieux. Ils devraient bientôt intégrer des recherches épidémiologiques relatives aux effets du changement climatique sur les maladies humaines, animales et végétales, ce qui permettra d'améliorer la précision des modèles numériques.

Enfin, insistons sur le fait que l'identification et la quantification des effets des changements globaux sur la santé représentent un défi qui ne pourra être relevé que si climatologues, épidémiologistes, modélisateurs, écologues, entomologistes, microbiologistes, parasitologues, immunologistes, socio-économistes, entre autres, travaillent ensemble sur un projet intégré.

### Bibliographie

- C. Leport et J.-F. Guégan, *Les maladies infectieuses émergentes. État de la situation et perspectives*, La Documentation française, 2011.  
 N. Brisson et F. Levrault (éd.), *Le Livre Vert du projet Climator*, Ademe, 2010.  
 K. Smith et J.-F. Guégan, *Changing Geographic Distributions of Human Pathogens*, *The Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics*, vol. 41, pp. 231-250, 2010.  
 M. Delavière et J.-F. Guégan, *Les effets qualitatifs du changement climatique sur la santé en France – Rapport de Groupe interministériel*, La Documentation française, 2009.  
 K. Lafferty, *The Ecology of Climate Change and Infectious Diseases*, *Ecology*, vol. 90, pp. 888-900, 2009.

■ POUR LA

# SCIENCE

Mars 2015

[www.inra.fr](http://www.inra.fr)

Ne peut être vendu

Édition française de Scientific American


# L'ADAPTATION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE





**POUR LA**  
**SCIENCE**

**ADEME**



Agence de l'Environnement  
et de la Maîtrise de l'Énergie



**INRA**  
SCIENCE & IMPACT