

Changement climatique et santé

JEAN-PIERRE BESANCENOT

468, chemin des Fontaines
83470 Saint-Maximin la
Sainte-Baume
France
<jean-pierre.besancenot@-
wanadoo.fr>

Tirés à part :
J-P. Besancenot

Résumé. Il y a désormais des preuves solides que le climat de la terre est en train de changer à un rythme rapide, pour l'essentiel en raison de l'accroissement des émissions de gaz à effet de serre par les activités humaines. Tout porte à penser que la tendance s'accroîtra dans les décennies qui viennent. Depuis quelque temps, la question des impacts directs et indirects de ce changement climatique sur la santé publique suscite un vaste débat. Cependant, il n'est jamais facile de séparer le plausible de l'improbable, ce qui relève de la science de ce qui est désinformation ou parti pris militant. L'objet du présent article est de faire le point des connaissances et des hypothèses sur le sujet, en mettant l'accent sur les aspects qui ont connu des avancées significatives depuis 2012. Les effets directs sur la santé font avant tout intervenir le stress thermique dû à l'accroissement de la fréquence, de l'intensité et/ou de la persistance des canicules, avec leur cortège d'hyperthermies, de coups de chaleur et de maladies cardiovasculaires ou respiratoires. La baisse de la mortalité due au froid ne saurait compenser la recrudescence de la mortalité due à la chaleur. D'autres phénomènes météorologiques extrêmes, tels que longues sécheresses, violentes tempêtes, pluies diluviennes ou cyclones tropicaux, peuvent également provoquer blessures ou décès. Quant aux effets indirects, ils passent par l'altération des écosystèmes, par des perturbations de la production alimentaire et de la disponibilité en eau potable, par la dégradation de la qualité de l'air et par diverses conséquences sur les maladies infectieuses, spécialement les maladies à vecteurs. La conclusion est que la nature et l'ampleur des impacts potentiels du changement climatique varieront beaucoup à la surface du globe, en fonction du type de climat, du contexte socio-économique, de la structure démographique et de la résilience des différents pays.

Mots clés : changement climatique ; évaluation des impacts sur la santé ; morbidité ; mortalité ; santé publique.

Abstract

Climate change and health

There is now strong evidence that the earth's climate is changing rapidly, mainly due to the increase in greenhouse gas emissions from human activities. It suggests that the trend will continue to grow in the coming decades. For some time now, the question of the direct and indirect effects of climate change on public health has been a major topic of debate. However, it is never easy to separate the plausible from the unlikely, or science from either disinformation or activist bias. The aim of this paper is to present a review of current knowledge and hypotheses on the subject, focusing on key points for which significant advances have been made since 2012. Direct observed and projected effects on health include primarily thermal stresses due to the increased frequency, intensity, or persistence of heat waves, which can trigger heat exhaustion and heatstroke as well as cardiovascular and respiratory diseases. Any decrease in cold-related deaths cannot outweigh this increase in those related to heat. Other extreme weather events, such as long drought periods, severe storms, heavy precipitation, and tropical cyclones, can also have adverse outcomes and cause injury and death. Among the indirect effects of climate change are the alteration of ecosystems, disruption of food production and of safe water supplies, the worsening of air quality, and all of their consequences for infectious (especially vector-borne) diseases. In conclusion, the nature and extent of the potential effects of climate evolution will vary markedly on the earth's surface depending on climate type, socioeconomic context, demographic structure, and each country's resilience.

Key words: climate change; health impact assessment; morbidity; mortality; public health.

Pour citer cet article : Besancenot JP. Changement climatique et santé. *Environ Risque Sante* 2015 ; 14 : 1-21. doi : 10.1684/ers.2015.0813

« *What we know is that the temperature of the planet is rising. [...] We also know that it has an impact on public health.* »

Barack Obama, Howard University, April 7th 2015

« *The future is inherently uncertain...* »

Kristie L. Ebi. Health in the new scenarios for climate change research. *Int J Environ Res Public Health* 2013 ; 11 : 30

« ... les modèles sont tous incapables de simuler complètement le riche éventail des changements économiques, démographiques, comportementaux et technologiques qui accompagneront inévitablement le cours futur du changement climatique. Néanmoins, [...] ces modèles sont ce que la science est capable actuellement de faire de mieux pour approcher l'ampleur des risques nouveaux induits par le changement climatique auquel les populations futures devront faire face. »

Jean Lesne. Commentaires. Effets du changement climatique sur la transmission du paludisme en Afrique de l'Ouest. *Environ Risque Sante* 2014 ; 13 : 190

Depuis Hippocrate, l'idée s'est peu à peu imposée que la santé humaine est, à bien des égards, tributaire du climat et des conditions météorologiques [1, 2]. Dès lors, si le climat change – et le degré de confiance à accorder à cette hypothèse est jugé de plus en plus fort (encadré 1) –, il faut s'attendre à de multiples répercussions sur notre santé, certaines pouvant se révéler lourdes de conséquences [3-8], au point de rendre indispensable une refonte des politiques sanitaires et des dispositifs de surveillance [9, 10]. C'est ainsi que, du seul fait du *global warming*, rebaptisé *climate change*, l'Organisation mondiale de la santé (OMS) redoute, aux alentours de 2030, une surmortalité moyenne annuelle de l'ordre de 250 000 décès, dont environ 38 000 causés par la surexposition à la chaleur, 48 000 par des diarrhées, 60 000 par le paludisme et 95 000 par la malnutrition infantile [11]. Les effets prévisibles recouvrent à la fois l'influence directe sur l'organisme humain des événements météorologiques extrêmes, notamment des paroxysmes thermiques, et des effets indirects qui font intervenir, sans que la liste soit limitative, la production alimentaire, les ressources en eau, la pollution de l'air et les nouveaux équilibres biologiques susceptibles de conduire à l'émergence, à la résurgence, à l'intensification et/ou à la localisation inhabituelle de diverses maladies infectieuses ou parasitaires. Cela dit, il ne fait guère de doute que la nature et l'ampleur des impacts potentiels varieront beaucoup à la surface du globe, en fonction du type de climat, du contexte socio-économique, de la structure démographique et de la capacité des différents pays à réagir [12]. Parce que l'irrationnel est le compagnon permanent des incertitudes et de la peur, le moment

Encadré 1

Le changement climatique

Bien qu'intuitivement perçu comme un état stable permanent, le climat a toujours présenté une variabilité naturelle à caractère aléatoire, à laquelle se surimposait une variabilité tendancielle, le plus souvent lente et modérée. Aux facteurs physiques « externes », responsables de cette évolution, s'ajoute depuis le début de l'ère industrielle, et risque de s'ajouter de plus en plus, une autre modalité de variation, liée aux activités humaines, avec un rythme plus rapide et une amplitude renforcée. Le principal mécanisme explicatif invoqué est une intensification de l'effet de serre, dû à un dégagement massif de différents gaz traces qui « piègent » sous forme de chaleur, dans les très basses couches de l'atmosphère, une partie du rayonnement infrarouge réémis par la surface terrestre. Au niveau mondial, hors vapeur d'eau et ozone, le dioxyde de carbone CO₂ contribue actuellement pour environ 60 % à l'effet de serre additionnel, le méthane CH₄ pour 15 %, le protoxyde d'azote N₂O pour 5 % et différents composés chlorés, fluorés et soufrés créés par l'industrie (CFC, HCFC, HFC, PFC, SF₆, etc.) pour 20 %. L'ensemble des émissions a augmenté de 80 % entre 1971 et 2010 – sans que la situation aille en s'améliorant : de 2001 à 2010, du fait d'un retour en force de l'utilisation du charbon, la hausse a atteint 2,2 % par an contre une moyenne de 1,3 % durant les trois décennies précédentes. Les émissions de 2011 ont dépassé de 45 % celles de 2005 !

Les preuves convergent aujourd'hui en faveur d'un réchauffement déjà engagé, avec une tendance qui se serait accentuée au cours des années les plus récentes. Après correction de multiples biais, et même si la précision fournie est illusoire, la hausse de la température moyenne planétaire est évaluée à 0,85 °C sur la série 1880-2012, surfaces océaniques et continentales confondues. Les trois dernières décennies sont les plus chaudes que l'hémisphère nord ait connues au cours des treize ou quatorze derniers siècles. De surcroît, neuf des dix années les plus chaudes depuis qu'ont débuté les relevés instrumentaux sont postérieures à l'an 2000, le record revenant à 2014 (où la température s'est inscrite à 0,69 °C au-dessus de la moyenne du siècle précédent), puis aux années 2005 et 2010. Par-delà quelques irrégularités, la tendance est encore plus forte en Europe, et spécialement en France. Les experts estiment à plus de 95 % la probabilité que cette élévation de la température soit bien le fait de l'accumulation des gaz à effet de serre d'origine humaine.

Il est plus aventureux de se projeter vers le futur. À l'observation il faut alors substituer le recours à des outils de modélisation qui prennent en compte, outre la totalité des émissions anthropogènes, l'intensité du flux

solaire incident, la circulation océanique, les échanges thermiques océan-atmosphère et, pour les plus aboutis, l'injection par l'homme d'aérosols sulfuriques dans la stratosphère. Les résultats obtenus, qui reposent toujours sur des hypothèses restrictives, sont moins des prévisions de nature probabiliste que des scénarios d'évolution possible, en fonction de différents postulats de contrôle technico-socio-économique des émissions de gaz à effet de serre. Tel est notamment le cas des projections diffusées par l'*Intergovernmental panel on climate change* (IPCC), ou en français Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). Son cinquième rapport, daté de fin 2014, fait état à l'horizon 2081-2100, par rapport à la période 1986-2005, d'une possible élévation des températures moyennes à la surface de la planète s'échelonnant de 0,3 °C (dans le scénario le plus vertueux, jugé extrêmement peu réaliste) à 4,8 °C (dans le scénario le moins sobre, qui suppose que les émissions carbonées continuent à leur rythme actuel). D'ici à 2050, la France métropolitaine pourrait par exemple afficher une hausse thermique moyenne de 0,6 à 1,3 °C par rapport aux années 1976-2005. La tendance s'accélérerait rapidement ensuite, sur la période 2071-2100, avec un relèvement moyen de 2,6 à 5,3 °C, et susceptible de dépasser largement les 5 °C en été dans le sud-est du pays.

Pour interpréter ces chiffres, il est essentiel d'avoir à l'esprit qu'un réchauffement de 4 °C nous ramènerait à la situation qui prévalait il y a 45 millions d'années, à l'Éocène moyen, quand le palmier prospérait dans le Bassin parisien et le bananier jusqu'en Alaska. Plus précisément, 1 °C de hausse « équivaut » à un déplacement approximatif de 200 km en direction du pôle, ou à une remontée d'environ 150 m en altitude. En conséquence, à 3,5 °C de réchauffement, les actuelles températures de Marseille se retrouveraient sur le Luxembourg à la fin du présent siècle, et il faudrait monter à un peu plus de 500 m pour enregistrer l'équivalent des conditions thermiques observées aujourd'hui au niveau de la mer. Ce n'est donc pas à des retouches de détail qu'il faut s'attendre, mais à une profonde transformation de la répartition spatiale des climats de la terre. Encore la hausse des températures ne serait-elle uniforme ni dans le temps ni dans l'espace : plus marquée de nuit et en hiver que de jour et en été, elle culminerait dans le monde polaire et sur ses marges (jusqu'à +10 °C dans certains secteurs de l'Arctique) et ne dépasserait sans doute pas 2 à 3 °C en zone intertropicale. Elle n'exclurait pas des refroidissements en certains endroits ou à certaines périodes. En outre, l'élévation de la température se répercuterait inévitablement sur le volume et la localisation des précipitations : pluies plus abondantes dans les régions et aux saisons où il pleut déjà beaucoup, pluies plus parcimonieuses dans les régions et aux saisons où il

pleut déjà fort peu, comme les latitudes subtropicales, domaine méditerranéen inclus. Enfin, le réchauffement s'accompagnerait sans doute d'une fréquence accrue et/ou d'une intensité majorée des grands paroxysmes météorologiques et des phénomènes extrêmes, tels que longues sécheresses, violentes tempêtes, pluies diluviennes ou – mais cela reste débattu – cyclones tropicaux.

paraît venu de tenter un bilan dépassionné. L'accent sera mis sur les points qui, depuis 2012, ont suscité des recherches nouvelles conduisant à un approfondissement ou à une remise en cause au moins partielle des connaissances ou des hypothèses antérieures.

Les effets directs du changement climatique sur la santé

Un être vivant ne peut vivre que dans un intervalle relativement étroit de conditions thermiques, ou plus largement climatiques, définissant un optimum de part et d'autre duquel la santé, et parfois la vie elle-même, est menacée. *L'Homo sapiens* ne fait pas exception à la règle, même si la technologie et la culture lui permettent dans certaines limites de compenser l'agressivité des conditions extérieures. D'où la priorité accordée, dans les recherches sur l'impact sanitaire du changement climatique, aux phénomènes extrêmes déjà observés [13] et aux événements météorologiques aujourd'hui exceptionnels qui ont une forte probabilité de l'être de moins en moins dans le futur, au point de devenir peut-être la norme de demain [6, 14]. Sans exclure certaines évolutions inattendues, comme un renforcement du froid de l'hiver, les modèles climatiques prédisent avant tout un accroissement de la fréquence des vagues de chaleur et des épisodes de fortes précipitations, mais aussi des sécheresses (au moins sur les marges de la zone subtropicale), ainsi qu'une augmentation de la violence des cyclones tropicaux et, avec un degré de confiance moindre, une baisse de leur nombre [5, 7]. Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) fait état d'une probabilité supérieure à 90 % que ces extrêmes aient des conséquences de plus en plus marquées sur la santé des générations futures [7]. Et si certaines de ces conséquences peuvent être bénéfiques, la plupart seront sans doute néfastes [3, 4, 6, 8].

Le stress lié à la chaleur et les méfaits des périodes caniculaires

Dans l'aire d'extension des climats tempérés, l'objection est qu'un peu de chaleur supplémentaire ne saurait faire de mal. Pourtant, les risques les plus prégnants, mettant en péril les plus vulnérables des populations

exposées, sont directement liés à la hausse des températures. Les nouvelles dispositions thermiques détermineraient une surmorbidity et une surmortalité estivales, moins du fait de la mise en échec absolue des mécanismes thermorégulateurs (hyperthermie, coup de chaleur) que par un effet déclenchant ou précipitant sur diverses maladies, ou par l'aggravation de phénomènes pathologiques préexistants. Cela se vérifierait en présence de la chaleur « ordinaire » et, plus encore, à l'occasion des épisodes caniculaires.

La chaleur « ordinaire »

Nombre de publications récentes confirment la quasi-universalité de la courbe « en U » (parfois « en J » ou « en V »), reliant au pas de temps journalier la mortalité [3-8, 15] ou plus rarement la morbidité [16, 17] à la température de l'air. À partir de là, la tentation était grande d'élaborer des modèles permettant d'évaluer l'importance et le rythme de la surmorbidity ou de la surmortalité à attendre en présence d'un réchauffement moyen de telle ou telle ampleur [18]. C'est ainsi par exemple que Hajat *et al.* font état d'une hausse « probable » de 257 %, d'ici à 2050, du nombre annuel des décès dus à la chaleur au Royaume-Uni [19]. Presque exclusivement estivaux, les risques seraient majorés chez les femmes enceintes et les personnes âgées, mais aussi au travail, surtout dans les populations défavorisées [20]. Le coût social, mais aussi économique, serait considérable : à Brisbane, par exemple, où 6 500 années de vie ont en moyenne été perdues chaque année du fait de la chaleur entre 1996 et 2003, le chiffre pourrait être majoré de 400 à l'horizon 2050 avec un réchauffement de 2 °C, et de 3 000 avec un réchauffement de 4 °C [21]. Les modèles ainsi mis en œuvre ont pour la plupart l'inconvénient de se borner à extrapoler la situation actuelle et de négliger les possibilités d'adaptation, technologique ou comportementale. Quelques-uns commencent toutefois à intégrer ce paramètre, ce qui élargit considérablement l'éventail des impacts possibles et souligne la faible précision des résultats : dans les pays andins, la surmortalité induite par l'élévation de la température moyenne pourrait varier dans le rapport de 1 à 9 en 2030, et de 1 à 23 en 2050, selon le niveau d'adaptation individuelle et collective [22] !

Parmi les pathologies les plus susceptibles de voir leur prévalence augmenter à l'occasion d'un réchauffement du climat, la particulière vulnérabilité de l'appareil cardiovasculaire est corroborée par les recherches les plus récentes [23], qui offrent l'avantage de déboucher sur une quantification. Ainsi, dans les 11 plus grandes agglomérations urbaines d'Angleterre et du Pays de Galles, après contrôle de l'humidité relative et de la pollution atmosphérique, le risque d'infarctus du myocarde devrait s'accroître en juillet-août de 1,9 % ($0,5 < IC_{95} < 3,3$ %, $p = 0,009$) pour chaque degré supplémentaire au-delà de 20 °C [24]. Mais le réchauffement peut aussi avoir des effets sur l'appareil respiratoire [25, 26], certains auteurs allant jusqu'à comparer sa nocivité à celle du tabagisme [27].

Comme les interférences sont nombreuses avec la pollution chimique de l'atmosphère et avec son contenu en allergènes, ce point sera examiné plus en détail ci-dessous. Nous nous contenterons pour l'instant de noter que dans l'État de New York, et par rapport aux années 1991-2004, la chaleur à elle seule pourrait multiplier par 2 à 6 le nombre des hospitalisations pour maladies respiratoires d'ici à 2080-2099 [28].

Les grandes vagues de chaleur

Jusqu'en 2011, rien ne permettait d'attribuer les vagues de chaleur épisodiques à autre chose que la variabilité naturelle du climat. Depuis lors, Hansen *et al.* [29] ont renouvelé la question, en démontrant que les canicules dites « exceptionnelles » (dont la température moyenne s'écarte de plus de trois écarts-types de celle de la période de référence 1951-1980), ont affecté environ 10 % de la surface du globe entre 1981 et 2010, contre 0,1 à 0,2 % entre 1951 et 1980. Seul un forçage d'origine anthropique peut conduire à une telle « dérive ». Dans un environnement climatique « naturel », précisent les auteurs, deux faces du dé représenteraient un temps plus frais que la normale, deux autres seraient un temps normal et les deux dernières un temps plus chaud que la normale. En lançant les dés saison après saison, nous obtiendrions une équiprobabilité de réalisation des trois occurrences. Mais le changement climatique a faussé la donne : il y a maintenant quatre faces plus chaudes que la normale, l'une représentant la chaleur extrême [29]. L'un des consensus scientifiques les plus robustes est que, même dans les scénarios modérés d'émission de gaz à effet de serre, les épisodes caniculaires sont appelés à voir leur fréquence, leur intensité, leur extension spatiale et sans doute leur persistance augmenter graduellement à partir de 2040 [30]. Si des vagues de chaleur dites « sans précédent » (s'écartant de plus de cinq écarts-types de la distribution statistique de la période de référence) n'ont qu'une probabilité infime de survenir dans un monde à +2 °C, à partir de 4 °C de réchauffement « moyen », elles sont susceptibles de toucher 70 à 80 % de la superficie de l'Afrique du Nord, du Moyen-Orient et de certains secteurs des États-Unis.

Or, 70 000 Européens ont péri du fait de la vague de chaleur d'août 2003, dont environ 19 500 en France et un peu plus de 20 000 en Italie. Il faut donc s'attendre à ce que dans le futur, se produisent à intervalles rapprochés des crises sanitaires majeures, entraînant d'énormes surmortalités [11]. Leur ampleur est de mieux en mieux connue, y compris en termes de temps de vie perdu : +8 % par exemple à Stockholm et +22 % à Rome, chez les plus de 50 ans, dès que deux jours consécutifs dépassent le 95^e percentile de la distribution de la « température maximale apparente », qui est un indice bioclimatique combinant dispositions thermiques et dispositions hygrométriques pour rendre compte des contraintes physiologiques [31].

Les facteurs de risque ont fait l'objet de nouvelles investigations [32]. Celles-ci ont révélé que, si les

personnes âgées paient à peu près partout le plus lourd tribut aux canicules, le risque augmente parfois graduellement avec l'âge (c'est le cas à Rome) ; mais il arrive aussi, comme à Stockholm, que la tranche 50-74 ans soit aussi touchée que les plus de 75 ans [31]. Quant aux jeunes enfants, y compris en période périnatale, leur surmortalité reste faible, sauf en cas de grande précarité sociale et dans les villes du sud ou de l'est de la Méditerranée (Tunis, Tel Aviv) [33] ; mais ils sont souvent victimes d'une surmorbidity notable (problèmes rénaux, maladies respiratoires, déséquilibres électrolytiques, fièvre, etc.) [32, 34].

De même, la règle qui voulait qu'à âge égal le tribut payé par les femmes surpasse de 15 à 20 % celui des hommes doit être nuancée : si cela se vérifie en gros à Rome, spécialement chez les diabétiques, l'excès de risque concerne plutôt les hommes à Stockholm, surtout en présence d'une broncho-pneumopathie obstructive [31].

Le rôle de l'origine ethnique, longtemps tenu pour acquis, ne semble plus résister à l'analyse, aux États-Unis comme en Australie, après ajustement sur les conditions socio-économiques, sur la situation professionnelle et, plus marginalement, sur la barrière de la langue qui empêche parfois de comprendre les mesures de prévention [35].

La responsabilité d'un trop faible radoucissement nocturne est confirmée, les plus fortes surmortalités coïncidant avec le 99^e percentile de la température minimale journalière [36].

L'excédent « immédiat » de décès n'est pas toujours compensé par une sous-mortalité transitoire dans les jours, les semaines ou les mois suivants. En France, un effet moisson (*harvesting effect*) a bien été présent, sur les vingt jours qui ont suivi la vague de chaleur, en 1976 (-696 décès) et en 1990 (-1 224 décès), mais pas en 2003 (+754 décès). Le plus souvent, les vagues de chaleur modérées ne font que précipiter la fin de sujets très fragiles, dont l'espérance de vie était limitée ; mais les plus sévères emportent des individus qui, sans elles, auraient pu survivre – parfois longtemps. C'est donc seulement dans ce dernier cas qu'il est légitime de parler de « vrais » décès en excès [37].

Enfin, l'effet des canicules est majoré dans les grandes agglomérations et favorisé par le vieillissement de la population – ce qui conduit dans certains cas à des interprétations erronées : à Brisbane, le nombre annuel de décès attribuable aux vagues de chaleur s'établit en moyenne aujourd'hui à 134 ; au milieu du XXI^e siècle, il pourrait atteindre 933, mais l'effet du vieillissement serait dans cette hausse 5,6 fois plus important que celui du réchauffement [38]. Là encore, il reste difficile d'intégrer dans les modèles les possibilités d'adaptation et de résistance au stress thermique, susceptibles de ralentir l'évolution, à défaut de la neutraliser. Or l'adaptation existe : aux États-Unis, la surmortalité associée à la même hausse thermique de 5,6 °C a été divisée par 2,7 entre 1987 et 2005, avec quelques nuances selon les régions, mais sans relation significative avec l'équipement en climatisation [39].

Sans la mise en place de mesures énergiques de prévention, visant soit à réduire l'exposition aux canicules, soit à en limiter les conséquences sanitaires, il faut s'attendre à des bilans humains de plus en plus lourds. Une méta-analyse s'est penchée sur une douzaine de systèmes d'alerte et de plans nationaux canicule, à l'image de celui qui a été mis en place en France en 2004 [40]. Le résultat est sans appel sur leur efficacité pour réduire la mortalité, à un coût relativement modeste (210 000 US\$¹ à Philadelphie pour épargner 117 vies en trois ans), les exemples les plus probants venant de France (4 400 décès « toutes causes » évités en 2006) et de Hong-Kong (1,23 décès/j par cardiopathie ischémique et 0,95 décès/j par AVC évités chez les plus de 65 ans). L'impact sur la morbidité a encore été trop peu étudié pour autoriser la moindre conclusion. De plus, si ces dispositifs permettent de faire face efficacement à l'urgence [41], tous les auteurs insistent sur la nécessité d'engager une réflexion sur l'adaptation à long terme aux fortes chaleurs, en repensant les conceptions architecturales et urbanistiques ou les habitudes de vie [42].

L'éventuel effet salutaire d'une diminution des grands froids

Dans les pays développés de climat tempéré, spécialement dans l'hémisphère boréal, la mortalité culmine en saison froide depuis plus d'un demi-siècle. Il en a souvent été déduit que les hivers les plus rigoureux étaient aussi les plus meurtriers : c'est ainsi qu'en France, le bilan de janvier-février 1985 ne s'est pas limité aux 57 sans-abri victimes d'une hypothermie, mais qu'il s'est établi à environ 9 000 morts en surnombre, toutes les causes de décès se trouvant surreprésentées à l'exception des accidents de la route. Il a donc été supposé que, si l'hiver se radoucit, de telles hécatombes tendront à devenir plus rares, du fait notamment d'une réduction des risques respiratoires et cardiovasculaires [3-8]. Telle est la position défendue par les autorités sanitaires du Royaume-Uni jugeant très vraisemblable que, par rapport à l'an 2000, quelque 2 % des décès hivernaux puissent en moyenne être évités chaque année aux alentours de 2050, et 12 % vers 2080 [43]. L'évolution observée à Brisbane pendant quarante ans (1968-2007) rend la thèse crédible, avec un rapport du nombre de décès de la saison chaude sur le nombre de décès de la saison froide passé de 0,71 à 0,86 [44]. Mais les recherches récentes, inventoriées par Ebi et Mills [45], infirment cette hypothèse. L'analyse de la série 1987-2000 dans 99 villes des États-Unis a clairement montré que la surmortalité n'était proportionnelle ni à l'intensité du froid, ni à sa durée [46]. De même, en Angleterre et au Pays de Galles, le lien entre la mortalité hivernale et le nombre de jours froids (< 5 °C), peu contestable jusque dans les années 1970, s'est ensuite estompé avant de disparaître [47]. D'une part, il faut se

¹ 1 dollar américain = 0,90 euro.

garder de confondre tendance saisonnière à l'élévation des températures moyennes et diminution de fréquence ou d'intensité des vagues de froid. D'autre part, mortalité hivernale ne signifie pas toujours mortalité due directement au froid. L'erreur commise a sans doute été d'attribuer au radoucissement des hivers ce qui tenait plutôt à l'amélioration du chauffage des habitations, à une élévation du niveau de vie, au perfectionnement des soins de santé et à une extension de la vaccination antigrippale. Rien ne permet donc d'affirmer que le réchauffement à venir aura le même effet. Comme l'indiquent Kinney *et al.*, « dans un monde futur plus chaud, la mortalité saisonnière hivernale pourrait atteindre au moins les mêmes niveaux qu'aujourd'hui » [48]. D'où le degré de confiance « seulement moyen, voire faible » accordé à une éventuelle baisse du nombre des décès survenant au plus fort de l'hiver [7]. En tout cas, il paraît peu probable que le bénéfique à attendre d'hivers plus doux puisse – même à beaucoup près – compenser le coût des étés plus chauds et, notamment, des périodes caniculaires. Les simulations réalisées tant à New York [49] qu'à Hamilton, Montréal et Régina le confirment, même si le doute subsiste pour d'autres villes canadiennes [50].

Nous ajouterons que le déclin rapide de la banquise arctique causé par le réchauffement pourrait paradoxalement doubler le risque d'hivers inhabituellement froids. La fonte de la glace libère de l'eau qui, étant très sombre, absorbe davantage de chaleur ; cela réchauffe l'air sus-jacent et il en résulte un ralentissement du courant-jet, qui serpente, provoquant un blocage de la circulation atmosphérique et une « descente » d'air froid de l'Arctique vers l'Eurasie [51].

Les effets sanitaires des autres événements météorologiques extrêmes

Qu'elles soient brèves comme les tornades, ou plus étalées dans le temps comme les inondations et les sécheresses, les grandes catastrophes d'origine météorologique, avec leur lot de désolations, de dégâts et de victimes, affectent actuellement, chaque année, plus de 2 milliards de personnes dans le monde [52]. Jadis considérées comme exceptionnelles, elles se succèdent maintenant à un rythme qui paraît s'accroître et qui devrait encore s'accroître dans le futur. Des modifications sont attendues au XXI^e siècle dans le volume moyen des précipitations, qui s'accroîtrait à l'échelle globale mais avec d'importantes fluctuations dans le régime des pluies, selon la région et la saison considérées. Les experts s'accordent assez bien sur la perspective d'une très probable augmentation de la fréquence des orages et des épisodes de pluies diluviennes, générateurs d'inondations catastrophiques, notamment en milieu urbain ; le Sud-Est asiatique, l'Inde péninsulaire, l'Afrique orientale et la moitié nord des Andes seraient les secteurs les plus touchés [53, 54]. Les tendances demeurent plus controversées, mais vont plutôt dans le sens d'une intensifica-

tion, en ce qui concerne la durée des sécheresses, les extrêmes liés au vent et la violence (à défaut de la fréquence) des cyclones tropicaux.

Le bilan de ces grands paroxysmes est lourd [7] : en 2013, par exemple, les inondations ont tué dans le monde 9 819 personnes, et les tempêtes 8 583, ce qui représente respectivement 45,4 et 39,7 % de la mortalité causée par les catastrophes naturelles [55]. La plupart des auteurs redoutent que ces chiffres ne s'accroissent dans les décennies à venir, mais ils sont divisés sur la possible responsabilité du changement climatique dans cette évolution [7], qui devrait également beaucoup aux développements urbains imprudents, au surpeuplement et à l'anthropisation excessive des milieux naturels. Ce qui n'est pas vraiment contesté, c'est que les effets sanitaires à court terme sont prioritairement d'ordre traumatique (blessures, noyades) ; mais ils sont souvent suivis d'effets indirects (déclenchement d'épidémies liées à la contamination des eaux et à la désorganisation du système de soins [56]). Quelques mois plus tard, ce sont des répercussions sur la santé mentale qui s'inscrivent durablement dans leur sillage (troubles du sommeil, anxiété, phobies, stress post-traumatique, dépression, voire tendances suicidaires), surtout en cas de troubles psychiques antérieurs ou lorsque les populations ont dû être déplacées [57, 58].

Un cas particulier est celui des incendies de forêt et de brousse qui, sur la période 1997-2006, auraient occasionné chaque année, à la surface du globe, entre 262 000 et 532 000 décès prématurés, avec une moyenne de 339 000, dont 157 000 pour l'Afrique subsaharienne et 110 000 pour l'Asie méridionale. L'exposition chronique aux PM_{2,5} mêlées à l'ozone et à d'autres composés toxiques serait à l'origine de 81 % de ces décès [59]. Un niveau journalier de PM₁₀ de 900 µg/m³ a été relevé à Moscou lors des feux de forêts qui se sont multipliés pendant la canicule de 2010, avec des pics instantanés dépassant 1 500 µg/m³ [7], alors que la réglementation européenne impose de ne pas dépasser une moyenne annuelle de 40 µg/m³. Le vent peut ensuite transporter la pollution particulière sur des centaines, voire des milliers de kilomètres. Or dans bien des régions, l'élévation des températures moyennes couplée à l'intensification et/ou à l'allongement des sécheresses, risque d'accroître la sévérité des feux de forêts et, par la suite, d'alourdir leur bilan [6, 60]. Le phénomène a peut-être déjà débuté dans l'hémisphère nord : en 2007, un incendie a dévasté 1 000 km² dans la région de la rivière Anaktuvuk, en Alaska – phénomène sans précédent depuis 12 millénaires.

Les effets indirects du changement climatique sur la santé

Les effets sanitaires indirects du changement climatique seront rangés sous quatre rubriques principales, selon qu'ils passent prioritairement :

- par l'insécurité alimentaire ou l'altération de la valeur nutritive des aliments ;
- par la raréfaction et/ou la pollution de l'eau ;
- par la dégradation de la qualité de l'air ;
- par l'intervention de micro-organismes pathogènes, à l'origine de maladies infectieuses ou parasitaires, notamment celles qui impliquent une transmission vectorielle.

En dehors des méfaits de la pollution atmosphérique, les latitudes tropicales et subtropicales ont une forte probabilité d'être les plus touchées, surtout dans les pays pauvres où le système de soins reste précaire ; mais ni les latitudes extratropicales ni les pays riches ne pourront rester totalement épargnés.

Les effets sanitaires d'une insécurité alimentaire accrue

Une nourriture quantitativement suffisante et qualitativement équilibrée étant l'un des principaux déterminants de la santé, les conséquences du changement climatique sur les ressources alimentaires font l'objet de recherches de plus en plus fouillées [7, 61, 62], qui ont rendu obsolètes les schémas trop tranchés dont nous devons nous contenter jusque-là. Le réchauffement améliorerait indéniablement les rendements aux latitudes les plus élevées, et partiellement aux latitudes moyennes mais, à partir de 3 °C, ses effets seraient d'autant plus négatifs et favoriseraient d'autant plus la sous-nutrition que nous considérons des pays plus chauds, où plus de 800 millions d'hommes, de femmes et d'enfants sont déjà dans l'incapacité de manger à leur faim [63]. En zone intertropicale, avec un degré de confiance moyen à fort [7], les modélisations actuelles envisagent d'ici à 2050 une chute moyenne des rendements de l'ordre de 8 %, mais cachant d'énormes disparités d'un pays ou d'un produit à l'autre. En Afrique subsaharienne, la baisse s'établirait à 17 % pour le blé, 15 % pour le sorgho, 10 % pour le mil et 5 % pour le maïs. Dans le sud de l'Asie, ce serait -16 % pour le maïs et -11 % pour le sorgho, l'impact restant nul ou inconstant pour le riz, la canne à sucre et le manioc [63]. Rien ne prouve que les progrès de la technologie et de l'agronomie suffiront à compenser ces chutes de productivité, surtout que les récoltes risquent d'être localement compromises par la contamination fongique, bactérienne ou virale que favoriseraient inévitablement les nouvelles conditions thermo-hygrométriques. La sous-alimentation et les retards sévères de développement staturo-pondéral pourraient alors toucher, dans ces deux régions et du seul fait du changement climatique, 25 millions supplémentaires d'enfants de moins de cinq ans, largement concentrés dans les pays à faibles revenus (soit +17 à +22 %, avec un pic éventuel au-delà de 60 % dans le Sud-Est asiatique) [7]. Le Kenya a déjà montré en années successives, depuis 1975, une excellente proportionnalité entre, d'une part, la hausse de la température ou le déclin des précipitations et, d'autre part, la médiocrité des récoltes ou la prévalence des carences nutritionnelles chez les enfants en bas âge [64].

Nous comprenons, dans ces conditions, que l'OMS voie dans la malnutrition le premier risque sanitaire lié au changement climatique [3], capable de compromettre la sécurité alimentaire à l'échelle du globe tout entier, alors même que l'offre devrait progresser d'environ 60 % d'ici à 2050 pour satisfaire la demande, étant donné l'élévation prévue de la population mondiale [61].

La réduction de la production vivrière peut aussi avoir des effets plus inattendus, par le biais d'une hausse et d'une volatilité des prix qui se répercuteraient sur les comportements d'achat des populations les moins aisées, tentées de « se rabattre » sur des aliments transformés, de moindre qualité nutritionnelle, souvent très gras et sucrés mais assez peu sensibles aux fluctuations tarifaires des produits de base. D'où, cette fois, une exacerbation de l'obésité plutôt que de la sous-nutrition [65].

Les pays développés eux-mêmes ne seraient pas épargnés, ne serait-ce qu'en raison de la mondialisation du marché des denrées alimentaires [66]. En Europe, d'ici à 2080, la hausse des températures réduirait de 10 à 11 % la superficie des terres cultivables, à quoi il conviendrait d'ajouter une diminution excédant 10 % des surfaces en prairies naturelles et en herbages. La chaleur limitant en outre la productivité primaire nette dans les écosystèmes tempérés, un simple réchauffement moyen de 2 °C pourrait réduire de 3 à 17 % le rendement des céréales sous les moyennes latitudes de l'Amérique du Nord et de l'Eurasie. La conjonction d'étés plus chauds (+2 à 4 °C) et plus secs (-10 %) abaisserait de 20 %, en 2050, le rendement du maïs dans la *corn belt* des États-Unis. Le domaine méditerranéen, souffrant d'un déficit pluviométrique accru, serait encore plus affecté [56]. La production de fruits et légumes frais serait particulièrement touchée, à l'exemple de ce qui s'est produit en France lors la canicule de 2003, où les rendements de l'arboriculture ont chuté de 25 %.

Il faut ajouter une baisse de la valeur nutritive de certains produits. Des simulations sous les concentrations de CO₂ attendues pour le milieu de ce siècle ont révélé que, s'il a un effet fertilisant (*via* la stimulation de l'activité photosynthétique), le gaz carbonique agit sur la qualité de la production agricole : certains micronutriments comme le zinc ou le fer diminuent significativement (-5 à -9 %) dans les céréales (blé, riz), les légumineuses (pois) ou les oléagineux (soja) cultivés dans un air enrichi en CO₂ ; maïs, sorgho et millet sont moins touchés. Cela aura des conséquences inévitables sur la santé des enfants et des femmes en âge de procréer, qui sont déjà 2 milliards à souffrir de carences en zinc ou en fer, provoquant chaque année, dans les pays développés, une perte de 63 millions d'années de vie [67].

Les effets sanitaires de la raréfaction et de la pollution de l'eau

La quantité et la qualité des ressources en eau, déjà sous tension, ont une forte probabilité d'être affectées négativement par le changement climatique. Les spécialistes sont

presque unanimes à considérer, avec un haut degré de confiance, que pour chaque degré de réchauffement, 7 % de la population mondiale devraient voir leurs ressources hydriques baisser d'au moins 20 %, alors même que la demande augmenterait de façon drastique du double fait de l'accroissement démographique et de l'insuffisance de l'assainissement des eaux usées [68]. Par rapport à la situation actuelle, la pénurie d'eau potable dans le monde pourrait s'aggraver d'environ 20 % au xx^e siècle [7]. Le régime des pluies étant également affecté avec, selon les endroits et les saisons, des inondations plus fréquentes ou des sécheresses plus intenses, les disparités entre régions devraient encore s'accroître et toucher tous les aspects de la vie, de la capacité des différents pays à nourrir leurs habitants à celle de soigner leurs enfants. Le domaine subtropical aride ou semi-aride (Maghreb, Machrek, etc.) serait particulièrement pénalisé puisqu'un réchauffement de 4 °C y abaisserait de 20 à 50 % les précipitations. La quantité d'eau disponible détermine d'ailleurs largement sa qualité, notamment via la concentration microbienne : le manque d'eau salubre compromet l'hygiène et provoque de redoutables flambées d'infections à transmission hydrique [56]. Encore faut-il se garder de conclure trop vite : ce qui importe, c'est toujours la résultante des effets négatifs (dominants en saison sèche) et des effets positifs (fréquents en saison des pluies), comme cela a été montré au Botswana [7].

L'excès d'eau a paradoxalement des effets peu différents de ceux de la pénurie [5, 6]. Ainsi, après ingestion d'une eau contaminée ou à l'occasion d'activités aquatiques récréatives, ce sont dans 55 % des cas les grands paroxysmes pluviométriques qui, surtout lorsqu'ils entraînent des inondations, sont à l'origine de l'explosion des épidémies de diarrhées chez les jeunes enfants [69], y compris dans les pays développés [70], même si les risques majeurs se localisent dans les pays les plus pauvres, comme le Bangladesh. Or, dans un monde à +4 °C, les risques d'inondations se multiplieraient de façon exponentielle : les modélisations d'échelle régionale réalisées sur la région des Grands Lacs indiquent que le nombre moyen annuel d'épisodes de submersion des terres augmenterait de 50 à 120 % d'ici à 2100. Or, les eaux d'inondation sont régulièrement contaminées par des matières fécales ou par des agents pathogènes entériques [71]. L'élévation de la température de l'eau, consécutive au réchauffement de l'air, renforce les risques, en favorisant la prolifération des micro-organismes et en allongeant la durée de vie des germes pathogènes.

Chaque degré Celsius de réchauffement pourrait élever de 3 à 11 % le nombre d'enfants de moins de cinq ans mourant chaque année d'une maladie diarrhéique liée à la consommation d'eau insalubre [3] ; d'autres travaux récents, cantonnés aux zones tropicales et subtropicales, font état d'une hausse « possible ou probable » de 8 à 11 % dès 2039 [7, 72, 73]. Si nous acceptons les chiffres de l'OMS (environ 4 milliards de cas de maladie diarrhéique chaque année, entraînant 2,2 millions de décès) et en postulant

l'immutabilité des conditions socio-économiques, nous constatons que, pour un simple réchauffement moyen de 1 °C, il pourrait y avoir un surcroît de 320 millions de diarrhées infectieuses aiguës, conduisant à 176 000 décès surnuméraires ! Si la qualité du système sanitaire est susceptible de limiter le risque dans les pays à haut niveau de vie, il n'en va pas de même dans les pays pauvres, surtout en milieu rural et dans les quartiers urbains d'habitat spontané... Les bilharzioses appellent une remarque voisine. Des simulations portant sur la Chine indiquent que, dans un scénario climatique médian, *Schistosoma japonicum* coloniserait 784 000 km² supplémentaires et menacerait 20 millions de personnes supplémentaires d'ici à 2050 (en fait toutes les régions où le plus fort de l'hiver serait épargné par les gelées). Quant à *Schistosoma mansoni*, agent de la bilharziose intestinale, il verrait sa présence augmenter dans les régions où les températures tourneraient autour de 30 °C, mais diminuer une fois ce seuil franchi, et s'effondrer là où la température atteindrait 35 °C [7, 12], à cause d'une forte mortalité des bulins et planorbes qui servent d'hôtes intermédiaires aux schistosomes, ainsi que des larves. Mais la prudence reste de règle, car la prévalence de la bilharziose n'est que pour une faible part fonction de la charge parasitaire.

Les incertitudes sur l'impact du changement climatique restent plus nombreuses à propos des maladies à transmission hydrique que dans d'autres domaines. Deux raisons principales à cela : l'une tient à la non-linéarité des effets de la pluviométrie (à la différence de ceux de la température) sur la qualité de l'eau, l'autre est que seules les échelles les plus fines se prêtent à ce genre d'investigations et qu'il est vain de vouloir énoncer des conclusions à valeur universelle, ou même régionale.

Les effets sanitaires de la dégradation de la qualité de l'air

Il convient de distinguer la pollution physico-chimique de la pollution biologique, l'impact du changement climatique étant mieux établi pour la seconde que pour la première.

La pollution physico-chimique

Le changement climatique peut affecter la qualité de l'air, et son influence a été longtemps sous-estimée [74-76]. Le GIEC redoute ainsi une aggravation de la pollution urbaine directement liée à la hausse des températures. Cela vaut en premier lieu pour les polluants photochimiques : un surcroît de rayonnement solaire pourrait non seulement allonger la saison où sévissent de forts niveaux d'ozone, mais aussi majorer l'intensité des pics, au moins dans les régions densément peuplées. Si nous peinons à trancher pour les latitudes élevées, il s'agit là d'une perspective inquiétante pour de nombreuses régions, et pas seulement en domaine méditerranéen : à Chicago, par exemple, le nombre de jours d'été où le

niveau d'ozone dépasse le seuil américain (75 ppbv) est étroitement corrélé au nombre de jours excédant 32 °C ($R^2 = 0,57$) [6]. Quant à la pollution particulaire (surtout par les $PM_{2,5}$), elle est susceptible de diminuer faiblement en hiver, mais d'augmenter fortement en été, spécialement en Extrême-Orient et en Asie du Sud, ou plus généralement dans les pays à faible niveau de vie [6].

Il ressort de l'analyse groupée de 11 grandes villes européennes que, si le rôle du SO_2 , du CO et même du NO_2 demeure négligeable, un pic d'ozone à plus de $104 \mu g/m^3$ accroît de 54 %, toutes choses égales par ailleurs, la surmortalité des vagues de chaleur chez les sujets âgés de 75 à 84 ans. C'est un peu la même chose pour les PM_{10} qui, au-delà de $50 \mu g/m^3$, augmentent de 36 % et de 106 % la surmortalité des périodes caniculaires, respectivement, dans la tranche d'âge 75-84 ans et chez les plus de 85 ans. Ces résultats concernent essentiellement les décès d'origine cardiovasculaire [77]. De même à Paris, il a été suggéré – mais non encore démontré de façon irréfutable – que l'exposition chronique à la pollution atmosphérique, notamment au NO_2 , renforçait la vulnérabilité de la population à la chaleur ambiante, dans les quartiers socialement défavorisés [78]. Le projet ApheKom a en outre révélé que ramener les $PM_{2,5}$ à une moyenne annuelle ne dépassant pas $10 \mu g/m^3$ (valeur cible de l'OMS) dans 25 villes européennes pourrait allonger de 22 mois l'espérance de vie des citoyens trentenaires [79] ; 19 000 décès seraient ainsi retardés, avec un coût monétaire total évalué annuellement à 31 milliards d'euros.

Une des modélisations les plus convaincantes indique qu'à l'échelle de la planète, et en se limitant à son rôle sur les $PM_{2,5}$, le changement climatique prévu au xxi^e siècle, même dans un scénario de transition vers une économie à faibles émissions de carbone, pourrait accroître le nombre annuel des décès prématurés d'environ 100 000, avec quelque 900 000 années de vie perdue, tandis que par son rôle sur l'ozone (augmenté dans les endroits fortement peuplés, plutôt abaissé ailleurs), il pourrait occasionner environ 6 300 décès prématurés, cette fois très majoritairement d'origine respiratoire [77].

Une recrudescence printanière et/ou estivale des crises d'asthme est également à craindre à la suite d'un accroissement de la pollution atmosphérique, difficilement évitable en présence d'un réchauffement de grande ampleur. Il semble en outre que différents polluants agissent en synergie et qu'ils soient également capables de préparer, voire de renforcer l'action d'autres facteurs déclenchants de l'asthme, tels que divers allergènes.

La pollution biologique

Parmi les « nouveaux » dangers potentiellement dus au changement climatique, les allergies, et en particulier celles qui sont liées aux pneumallergènes, occupent une des toutes premières places. Rien n'est encore tranché au sujet des spores fongiques : certains auteurs voient leur

concentration dans l'air augmenter indistinctement au xxi^e siècle à mesure que le plein été et le début de l'automne se feront plus chauds [80], d'autres envisagent une évolution différente selon les taxons (quasi-stabilité pour *Alternaria*, forte baisse pour *Cladosporium*, hausse considérable pour les Ascospores, avec dans tous les cas un démarrage plus tardif de la « saison des moisissures ») [81]. Le cas des pollens est *a priori* plus simple et nombre d'études, à l'échelle planétaire [82] comme à l'échelle régionale [83], ont montré avec des arguments concordants que l'évolution avait dans leur cas débuté dès le milieu des années 1990 et allait désormais en s'accroissant. Un climat plus chaud a, tout d'abord, une forte probabilité d'anticiper les dates de floraison : à titre d'exemple, le début de pollinisation des plantes fleurissant en fin d'hiver ou au début du printemps avancerait en moyenne de quatre à cinq jours, sur l'ensemble de l'hémisphère boréal, pour chaque degré Celsius d'élévation de la température du trimestre janvier-mars [82]. Mais le changement climatique allongerait aussi la saison pollinique, augmenterait la concentration des grains de pollen dans l'air et accroîtrait leur contenu allergénique (évolution prouvée pour le bouleau et l'ambrosie, suspectée pour d'autres taxons) [82]. Ces différentes tendances se conjugueraient finalement pour renforcer l'occurrence et la sévérité des allergies respiratoires, rhinite ou asthme. En outre, et même si le temps de réponse de la végétation est lent, pour les arbres plus encore que pour les herbacées, une hausse des températures pourrait aussi amener le déplacement en latitude ou en altitude de l'aire de répartition de différentes plantes, dont certaines fortement allergisantes, et induire ainsi une nouvelle géographie des pollens, avec à titre d'illustration une lente colonisation du Royaume-Uni par l'ambrosie [84]. Enfin, et malgré l'effet antagoniste de l'ozone (qui abaisse le contenu en allergène Phl p 5 des grains de pollen de fléole des prés), des taux croissants de CO_2 atmosphérique sont susceptibles d'aggraver la prévalence des pollinoses, en augmentant de 50 %, voire de 200 %, la production pollinique de chaque fleur de *Phleum pratense* [85].

Les effets sanitaires des nouveaux équilibres biologiques

La question de l'impact du changement climatique sur les maladies infectieuses et parasitaires est, à la fois, celle qui a fait l'objet des investigations les plus nombreuses [3-8, 86, 87] et celle qui, à ce jour, a suscité les réponses les moins assurées, le GIEC les créditant au mieux d'un degré de confiance « moyen » [7]. Certes, bactéries, protozoaires et champignons microscopiques dépendent pour leur reproduction d'une température optimale de croissance, tandis que les virus ont un optimum thermique de réplication, au-delà et en deçà duquel les virions produits peuvent manifester des propriétés nouvelles ; mais ce

n'est pas sur les agents infectieux que les nouvelles conditions climatiques devraient agir le plus.

Les maladies à transmission vectorielle

Le principal sujet d'inquiétude tient plutôt à la possible modification de l'abondance et/ou de la distribution spatio-temporelle de différents vecteurs hématophages – insectes comme les moustiques et les phlébotomes ou acariens comme les tiques [88]. Le fait est que nombre d'arthropodes, surtout ceux qui passent successivement par une phase aquatique et par une phase aérienne, sont très sensibles à l'état thermohygrométrique ; c'est à travers eux que le changement climatique est le plus régulièrement incriminé dans l'évolution potentielle de la pathologie infectieuse. Abstraction faite d'éventuelles répercussions sur d'autres composantes du système épidémiologique, comme la végétation ou les comportements humains, l'impact d'un dérèglement du climat sur un vecteur peut se manifester selon plusieurs modalités, ni incompatibles ni mutuellement exclusives :

- modification de la *répartition spatiale* du vecteur, qui « remonte » vers le Nord (dans l'hémisphère boréal), « descend » vers le Sud (dans l'hémisphère austral) ou grimpe en altitude (un peu partout). Une élévation significative et durable de la température peut ainsi faciliter l'introduction d'un vecteur dans un milieu jusque-là indemne [88]. Elle peut aussi amener sa rétraction, voire sa disparition d'une région où il était présent, si les nouvelles conditions climatiques lui imposent un effort d'adaptation disproportionné à sa capacité de résistance ;
- modification de la *densité du vecteur*, une espèce rare devenant abondante lorsqu'elle bénéficie de conditions plus favorables, et réciproquement. Or, si le nombre de vecteurs est faible, une hausse même minime de ce nombre peut modifier de façon importante le risque d'infection. À l'inverse, quand le nombre de vecteurs est élevé, sa variation n'a pas forcément d'impact significatif sur l'incidence de la maladie ;
- altération de la *saisonnalité*, le caractère permanent ou saisonnier de la transmission ayant des répercussions capitales sur la rapidité d'acquisition et le niveau de l'immunité ;
- fréquence des *repas sanguins* (en principe plus élevée quand il fait plus chaud) ;
- production d'*œufs* (plus abondante à mesure que la température s'élève, jusqu'à un seuil variable d'une espèce à l'autre) ;
- allongement ou raccourcissement de l'*incubation extrinsèque*, donc de l'intervalle qui sépare l'infection du vecteur du moment où il devient infectant. Plus l'incubation extrinsèque est courte, plus la transmission a des chances de se produire. Sinon, le vecteur risque de mourir avant de devenir infectant, même s'il a déjà été infecté et *a fortiori* s'il l'a été à un âge avancé ;

– enfin, allongement de la *durée de vie du vecteur* (dans le cas d'un relèvement modéré de la température, surtout s'il va de pair avec un renforcement de l'humidité atmosphérique et des précipitations) ou raccourcissement (quand le réchauffement est trop marqué, ou qu'il s'accompagne d'une accentuation de la sécheresse).

Depuis 1990, de nombreux modèles ont scénarisé, à différentes résolutions, la distribution spatiale des principales maladies à transmission vectorielle, en fonction des variations du climat [87]. Ces scénarios débouchent sur la cartographie, sous forme d'« enveloppes », des nouvelles aires de répartition des espèces vectrices – et nous en déduisons à plus ou moins bon escient la nouvelle géographie de la maladie transmise. Mais ce genre d'études met surtout en lumière la simplification outrancière avec laquelle est habituellement abordé le thème des rapports entre climat et pathologie infectieuse [89]. Les modèles se sont complexifiés à partir de 2005, et sont devenus plus réalistes en privilégiant l'échelle régionale et le pas de temps mensuel, voire décennaire, mais aussi en intégrant un nombre sans cesse croissant de paramètres, parmi lesquels le changement climatique n'est pas forcément le plus influent [8, 87, 89]. Tous les écueils ne sont cependant pas surmontés. Chaque espèce répond différemment aux changements environnementaux. Le micro-organisme pathogène, son vecteur et l'homme, sans oublier un éventuel réservoir animal, forment un système difficile à décrypter, où les interactions sont nombreuses et les équilibres instables, et où les effets de seuil, difficiles à modéliser, jouent un rôle décisif [87] : la même hausse de température intensifie en certains endroits la transmission de l'agent infectieux et réduit ailleurs la survie du vecteur. De surcroît, la répartition spatiale d'une maladie ne se superpose jamais qu'imparfaitement à celle de son vecteur, car bien d'autres facteurs limitants sont à l'œuvre. Il n'y a pas non plus de stricte proportionnalité entre l'abondance d'un vecteur et l'intensité de la transmission, définie en termes de nombre de piqûres infectantes par personne et par an, le taux d'inoculation n'étant à son tour qu'un piètre prédicteur de l'incidence de la maladie associée – ne serait-ce qu'en raison de l'immunité qu'acquiert la population exposée à des piqûres répétées. Finalement, la transmission vectorielle n'est compréhensible qu'en faisant intervenir les multiples rapports d'interdépendance qui existent entre les vertébrés impliqués dans le cycle de transmission (réservoirs naturels de l'agent infectant, populations humaines ou animales réceptives), les micro-organismes pathogènes et les vecteurs. Toute déduction appuyée sur la seule bio-écologie des vecteurs expose à de graves déconvenues [89-91] et il est essentiel de ne pas déduire abusivement un rapport de causalité de la simple simultanéité de deux phénomènes, en l'occurrence l'évolution du climat et l'apparition de telle ou telle maladie hors du territoire auquel elle était historiquement associée.

La question la plus âprement débattue reste celle d'une possible colonisation des pays économiquement et

socialement développés des zones tempérées, domaine méditerranéen inclus, par des vecteurs jusqu'alors inféodés au milieu tropical ou subtropical [12, 88]. La complexité des écosystèmes en jeu permet difficilement de trancher. Pour que des maladies vectorielles débordent largement leur aire habituelle de répartition, il est nécessaire que les vecteurs se déplacent et qu'ils trouvent à leur point d'arrivée des conditions favorables à une installation durable. Or les arthropodes voyagent, activement (moustiques empruntant en masse les moyens de transport modernes, à commencer par les avions) ou passivement (tiques accrochées au pelage ou au plumage d'autres animaux). Mais sont-ils ensuite capables de s'acclimater et de faire souche ? Certains exemples ne laissent guère de place au doute, puisque c'est au rythme de la création des aéroports qu'*Aedes aegypti* a envahi les îles et îlots de la Polynésie. Encore s'agit-il là de migrations de vecteurs tropicaux à destination d'autres pays tropicaux, donc de migrations Sud-Sud. Bien que plus rares, des migrations Nord-Nord, voire Nord-Sud, sont aussi observées. Mais l'adaptation massive à un climat extratropical de vecteurs originaires des basses latitudes n'est attestée que ponctuellement. Une implantation définitive exigerait la capacité, pour le vecteur, de développer des gènes lui permettant d'entrer en diapause, pour survivre à un hiver froid. Le danger que constitue l'importation de nouveaux vecteurs est donc en partie atténué par les difficultés qu'ils rencontrent pour s'acclimater. La règle qui vient d'être énoncée (pas d'implantation durable à l'issue de migrations sud-nord) souffre néanmoins des exceptions – la plus évidente étant fournie par *Aedes albopictus* (encadré 2), capable de proliférer sous une large gamme de climats [92-94].

Le cas emblématique du paludisme

Le paludisme a longtemps été décrit comme « la » maladie appelée à subir de plein fouet l'effet du changement climatique [3-8, 87, 95]. Le postulat s'appuyait sur une théorie simple, où la densité des anophèles et la durée du cycle sporogonique seraient conditionnées par le contexte thermique : à 25 °C, le cycle complet requerrait entre 10 et 13 jours, contre 14 à 18 à 22 °C ; *Plasmodium falciparum* cesserait d'être transmis lorsque la température moyenne journalière descend au-dessous de 18 °C, et *Plasmodium vivax* au-dessous de 16 °C. De manière symétrique, il existerait un seuil supérieur, proche de 33 °C, au-delà duquel l'incubation extrinsèque ne parviendrait plus à son terme. De multiples modèles ont donc tenté de simuler les mécanismes par lesquels la température transforme l'écosystème du paludisme : le réchauffement augmenterait le niveau de transmission en un lieu donné et permettrait la transmission dans des régions et à des saisons où elle était auparavant entravée par un niveau thermique trop bas. Il pourrait en résulter une extension de la zone d'endémie sur les marges de l'espace actuellement impaludé. Un autre risque serait

celui d'une extension de la maladie vers des altitudes plus élevées, alors qu'aujourd'hui les montagnes tropicales sont en général indemnes au-dessus de 1 500 m en Asie ou de 1 800 m en Éthiopie [96]. Certains modèles suggèrent ainsi que le nombre de paludéens s'accroîtrait dans le monde de 300 millions d'ici à 2080 [97].

C'est sans doute ce que nous observerions si le réchauffement intervenait seul. Mais les tentatives récentes de hiérarchisation des variables expliquant la distribution spatio-temporelle du paludisme attribuent les rôles majeurs à la pluviométrie et/ou à l'hygrométrie, en reléguant la température au dixième rang [8]. Pour *Anopheles gambiae*, l'humidité du sol à elle seule rendrait compte de 56 % de la variabilité du taux d'inoculation entomologique [98]. De plus, les paramètres climatiques ne doivent jamais être considérés séparément : si le seul changement concerne la hausse thermique, les milieux humides s'assèchent, le nombre de moustiques s'effondre et l'incidence du paludisme régresse. Une deuxième génération de modèles, dits « climatiques intégrés », a donc été mise au point [89, 98] : leur principal enseignement est que la tendance au réchauffement et à l'accentuation de la sécheresse, attendue d'ici à 2050 sur l'Afrique occidentale, réduirait la durée de la saison du paludisme, sauf à la limite sud du Sahel [99]. Le risque malarique disparaîtrait même au nord du 15^e parallèle [100]. En Afrique orientale, où la hausse des températures interviendrait dans un contexte de précipitations inchangées ou majorées, la saison du paludisme serait au contraire allongée et la maladie grimperait au-delà de 2 000 mètres dès 2021-2030 [100]. Encore est-ce toute la biologie des vecteurs, dans ses rapports avec les conditions ambiantes, qui devrait être intégrée dans les modèles : si la mortalité des anophèles, jeunes et adultes, tombe à son niveau le plus bas entre 20 et 26 °C, leur longévité chute rapidement au-delà de 32 °C [101]. En outre, cela reste une simplification très abusive que de supposer linéaire le lien entre, d'une part, le climat et, d'autre part, la capacité vectorielle des anophèles ou la survie des parasites durant la période d'incubation. Il vient enfin d'être démontré que l'optimum de transmission du paludisme, longtemps placé à 31 °C, se situerait plutôt à 25 °C [102] : il s'ensuit que, dès 28 °C, la transmission amorce un net recul. Dès lors, toutes les projections antérieures doivent être révisées (le plus souvent à la baisse) et les modèles recalibrés. Une difficulté supplémentaire est de savoir comment l'action du climat se combinera avec d'autres facteurs influents, tels que la croissance démographique, la mobilité des populations, le mode d'utilisation des sols, la déforestation, la lutte antivectorielle, les phénomènes immunitaires, la résistance aux insecticides et aux médicaments, les conflits politico-militaires et, plus que tout, la pauvreté. Si les modélisations réalisées à échéance des années 2050 ou 2080, en présence de différents scénarios d'évolution du climat, plaident toutes en faveur d'un accroissement net des effectifs de la population exposée

au risque paludéen, elles renferment de telles incertitudes que toute conclusion demeure hasardeuse [90, 101].

Reste le problème de la réintroduction du paludisme dans les pays développés de climat tempéré. L'éventualité est aujourd'hui jugée extrêmement faible, au moins sous forme endémique et sous ses aspects les plus graves (*P. falciparum*), même si *P. vivax* a ré-émergé en Grèce [88]. De surcroît, si le phénomène devait se produire, la responsabilité du changement climatique serait minime, en regard de celle des conditions anthropiques. Il ne faut pas oublier que la malaria a sévi à l'état endémique en France du Néolithique au début du ^{xx}^e siècle et que, si elle a été éradiquée, ce n'est pas à la suite d'un refroidissement, mais grâce à la lutte antivectorielle, ainsi qu'à l'assainissement des terres humides et des marais. Ce n'est donc pas le climat qui constitue un facteur limitant et nous nous trouvons aujourd'hui dans la situation d'un anophélisme sans paludisme : tout porte à penser qu'en cas d'introduction de parasites dans les pays industrialisés où des anophèles sont présents, une quelconque modification climatique ne créerait guère de risque supplémentaire. En outre, des cas cliniques de paludisme importé sont régulièrement signalés aux abords des aéroports internationaux, sans qu'il en résulte de flambée épidémique. Seul un apport massif de parasites, d'une souche compatible avec les populations anophéliennes locales, pourrait occasionner une reprise de la transmission. Mais dans cette éventualité, il est probable que la réintroduction de la maladie serait aussitôt détectée, donc assez facilement maîtrisée. Il s'ensuit que, sans être nul, le risque reste faible, tant que sera maîtrisé le facteur humain. À l'inverse, des inquiétudes sont permises, par exemple, pour le territoire de l'ex-URSS, où étaient dénombrés 30 millions de cas annuels de paludisme avant la seconde guerre mondiale, où le relâchement de la lutte antivectorielle a permis une reconstitution progressive des populations d'anophèles et du réservoir de parasites, et où le système de santé souffre d'une telle désorganisation que ni la surveillance épidémiologique ni le contrôle des populations de vecteurs ne sont correctement assurés.

Quelques autres maladies infectieuses

Le constat dressé pour le paludisme (non-linéarité des effets de la température, interférence de quantité d'autres paramètres, climatiques ou non) vaut aussi pour nombre d'arboviroses, à commencer par la dengue. Celle-ci ne cesse de s'étendre, avec une incidence multipliée par 30 au cours du dernier demi-siècle [7, 103], tandis que l'apparition en 2010 de cas autochtones isolés en Croatie et en France a relancé le débat sur une possible réémergence hors de la zone tropicale. En Europe, à moyen terme (2041-2070) comme à long terme (2071-2100), trois secteurs ont été identifiés comme étant « à risque avéré » : le rivage méditerranéen, celui de l'Adriatique et la plaine du Pô [104]. Une modélisation récente laisse entendre que vers 2085, plus de la moitié de

l'humanité serait exposée à la dengue, contre 35 % si la température et l'humidité restaient stables [105]. Mais il est douteux que tous les paramètres influents aient été introduits dans le modèle et correctement pondérés. Åström *et al.* [106] ont montré qu'en cas de stabilité de la situation démographique et socio-économique, l'évolution attendue du climat faisait redouter pour 2050 l'exposition annuelle à la dengue d'environ 280 millions de personnes supplémentaires, mais que la prise en compte simultanée de l'évolution démo-socio-économique inversait la tendance et permettait d'espérer que 120 millions d'humains échappent chaque année au risque. L'exemple du Mexique est également éloquent : des températures minimales dépassant 18 °C, des maximales comprises entre 20 et 32 °C et des précipitations de 400 à 550 mm/an y accroissent fortement l'incidence de la dengue ; mais au-delà de 32 °C et de 550 mm/an de précipitations, c'est un effet diamétralement opposé qui est constaté [107]. De plus, s'il n'est pas déraisonnable de redouter pour ce pays une hausse de 40 % de la prévalence de la dengue d'ici à 2080 du fait du changement climatique [107], cette projection n'a de sens qu'en supposant tout le contexte constant – ce qui n'est une fois de plus qu'une hypothèse.

Transmis par les mêmes vecteurs, le chikungunya était considéré en Europe comme « exotique », seulement envisageable sous sa forme importée. Mais l'introduction, l'implantation et l'expansion d'*A. albopictus* (encadré 2), l'épidémie de 2007 en Émilie-Romagne, puis les cas autochtones isolés rapportés dans le sud-est de la France à partir de 2010 ont ébranlé cet optimisme. La double prise en compte des exigences écologiques du vecteur et des besoins thermiques du virus attire l'attention sur le risque d'extension de la maladie en Europe occidentale (France, nord de l'Italie et Benelux, notamment) dans la première moitié du ^{xxi}^e siècle, puis à partir du milieu du siècle en direction de l'Europe centrale (Allemagne, par exemple) ou orientale (bassinannonien). Dans le même temps, les risques tendraient sans doute à s'atténuer dans le domaine méditerranéen, mais sans y disparaître partout [92-94, 108, 109]. Faire intervenir les moyens de transport améliore encore la précision des projections obtenues [93]. Il reste que nous ne sommes toujours pas capable de prévoir les mutations du virus, responsables d'une part non négligeable de l'émergence de la maladie.

Dans le cas de l'infection à West Nile, qui ne cesse de gagner du terrain [110], ce n'est ni sur l'agent infectieux (un flavivirus), ni sur son vecteur (diverses espèces de moustiques, principalement du genre *Culex*) que l'action du changement climatique s'exerce le plus directement, mais sur le réservoir de virus, constitué par la faune aviaire sauvage, résidente ou migratrice. En milieu tempéré, les épidémies éclosent le plus souvent en fin d'été, à proximité de zones humides, simples flaques d'eau parfois, où de grandes concentrations d'oiseaux venus se désaltérer entrent en contact avec une forte densité de vecteurs culicidiens. Or, il arrive que des modifications climatiques en apparence insignifiantes opèrent de profonds

Encadré 2

***Aedes albopictus*, marqueur du changement climatique ?**

Le nom savant du moustique tigre asiatique est passé dans le langage courant en 2005-2006, lors de l'écllosion de l'épidémie de chikungunya à Mayotte et à la Réunion. *Aedes albopictus* s'est longtemps cantonné à l'océan Indien et au Sud-Est asiatique, avec quelques ramifications en direction de l'Extrême-Orient, sans que nous ayons la certitude qu'il s'agisse alors de la même espèce. Ce petit moustique d'à peine 0,5 cm, avec des rayures sur les pattes et une ligne blanche longitudinale sur le thorax, se développe majoritairement en zone urbaine. La femelle pond dans les eaux stagnantes et affectionne les gîtes anthropiques, comme les récipients suffisamment creux pour renfermer de l'eau croupie. Au milieu des années 1970, *A. albopictus* a quitté son aire d'origine pour se disséminer sur la majeure partie du globe. Dès 1979, il a été repéré en Albanie. Il a ensuite gagné le Nouveau Monde où, à partir de Houston, il a pris possession de tout l'est des États-Unis, du Texas au Delaware : en moins de deux ans, 17 États ont été envahis. Il est ensuite repassé en Europe où, à partir de 1990, il s'est mis à pulluler dans la moitié septentrionale de l'Italie, tout en faisant des incursions en Belgique, en Suisse (Tessin et bords du lac Léman), en Espagne, en Hongrie, en Serbie et au Monténégro... Il a également été détecté, parfois en minuscules colonies, parfois en grande abondance, au Mexique, au Brésil, en Afrique australe, au Nigéria, au Cameroun et dans le Pacifique Sud. Quelques spécimens ont été découverts en France à l'automne 1999, en Basse-Normandie et dans la Vienne, puis dans l'Oise ; une vigoureuse campagne d'éradication en est venue à bout, mais le moustique a ensuite été réintroduit dans les Alpes-Maritimes et, en 2004-2005, il s'est établi dans plusieurs quartiers de Menton, puis de Nice, d'où il a essaimé sur tout le littoral méditerranéen ; en 2015, il est présent dans plus de 20 départements. Certains experts estiment que l'espèce pourrait bientôt atteindre le cercle polaire arctique.

Sa forte expansion a d'abord été mise au compte presque exclusif du changement climatique, mais le fait qu'il survive sans trop de mal aux hivers de Pékin rend l'hypothèse peu crédible. En réalité, ce qui s'est passé au cours des dernières années semble avant tout lié au développement des transports, maritimes plus qu'aériens, et spécialement au commerce international des plantes ornementales (tiges de bambou coupées, cosses de noix de coco, etc.) ou des pneumatiques usagés, pour le rechapage. Les pneus sont en effet une marchandise peu fragile, stockée en plein air, en vrac ou en piles non protégées. Ces stocks, exposés aux intempéries, finissent par contenir de

grandes quantités d'eau constituant d'excellents gîtes de ponte, d'autant que cette eau accueille avec le temps de la matière végétale en décomposition et la flore bactérienne associée, qui constituent la nourriture des larves. Ces dernières peuvent donc survivre à des trajets de plusieurs semaines, et ce n'est pas un hasard si l'introduction d'*A. albopictus* dans un nouveau pays ou une nouvelle région s'est presque toujours faite à partir de sites d'entreposage de pneus, le transport ultérieur des containers par train ou par voie fluviale parachevant la dispersion. Le changement climatique ne serait donc pour rien dans la mise en mouvement et le caractère expansionniste de ce moustique.

Mais il peut ensuite faciliter son installation, en satisfaisant ses exigences écologiques. Même en cas d'introduction fortuite, son expansion vers le nord était naguère limitée par le froid de l'hiver et la fraîcheur du reste de l'année : ses limites pourraient être une température moyenne de janvier inférieure à 0 °C et une température moyenne annuelle ne dépassant pas 11 °C. Le changement climatique devrait modifier radicalement la donne : alors que le nord-est des États-Unis est actuellement infecté sur 5 % de sa superficie, le taux pourrait atteindre 16 % dans une vingtaine d'années, du seul fait du réchauffement, et 43 à 49 % à la fin du siècle ; plus de 30 millions d'habitants (contre 18 aujourd'hui), et quasiment toute la population urbaine, y seraient exposés. Dans les régions de climat tempéré, larves, nymphes et adultes sont en gros présents d'avril à novembre, l'espèce persistant en hiver au stade d'œuf en diapause.

Or, par ses piqûres, ce nouveau venu constitue non seulement une nuisance, mais aussi une sérieuse menace pour la santé. Il se comporte en effet comme un assez bon vecteur de la dengue et du chikungunya, de sorte que son implantation durable pourrait rendre bien des régions (comme le Midi de la France) réceptives à ces maladies. De plus, il permet *in vitro* la répllication d'au moins 24 autres arbovirus, même si cela n'a jamais été retrouvé en milieu naturel.

bouleversements dans la dynamique des populations d'oiseaux. Nombre de migrateurs au long cours ont ainsi déjà décalé leur aire de reproduction vers des latitudes plus élevées : sur 435 espèces nicheuses recensées en Europe, 32 seulement auraient reculé en direction du Sud ou du Sud-Est au cours des deux dernières décennies, alors que 196 ont progressé en direction du Nord ou du Nord-Ouest. Si nous acceptons l'idée qu'une élévation de 2 °C de la température accroît de moitié la capacité reproductive des oiseaux, il y a lieu de redouter une forte augmentation de la densité de certains d'entre eux, notamment divers échassiers susceptibles de transporter le virus West Nile.

Enfin, l'observation ornithologique révèle que les stratégies migratoires elles aussi sont en train d'évoluer, même si nous n'avons pas la certitude que ce soit sous l'influence de températures plus clémentes, puisque la thèse prévaut que les dates de départ et de retour seraient surtout déterminées par la durée du jour. En tout cas, il ne fait plus de doute que certains oiseaux reviennent en Europe à une date de plus en plus précoce. Le geai, par exemple, pond aujourd'hui son premier œuf de la saison avec une dizaine de jours d'avance sur le calendrier du début des années 1970. Le cycle de transmission de la fièvre West Nile peut dès lors débuter plus tôt, et le virus se voit amplifié. Pour l'avenir, la majorité des chercheurs [111, 112] s'attend à ce que les conditions favorables à l'introduction du virus et à sa circulation soient observées plus fréquemment qu'aujourd'hui, ce qui renforcerait le risque épidémique. D'ici aux années 2040-2069, et dans un scénario médian d'évolution du climat, le réchauffement des provinces canadiennes des Prairies pourrait multiplier par environ 18 le taux d'infestation, la période à risque débutant dès le mois de mai pour ne se terminer qu'en septembre, alors qu'elle se cantonne actuellement au trimestre juin-août [113].

Mais il serait présomptueux de déduire d'un phénomène aussi récent une tendance à long terme, d'autant que nous ignorons quel pourrait être l'impact d'une série d'hivers rigoureux. De plus, si la faune aviaire s'est fort bien accommodée jusqu'à présent d'un réchauffement modéré et en a tiré parti, il est permis de s'interroger sur la manière dont certains volatiles supporteraient le réchauffement plus fort annoncé pour la fin du siècle. Il faudrait alors s'attendre à ce que certains migrants transsahariens hivernent sur la rive européenne de la Méditerranée et le long des côtes atlantiques, ou même à ce qu'ils se sédentarisent, se coupant ainsi de tout contact avec la source du virus West Nile. Dans cette hypothèse, deux cas seraient à considérer. Ou bien le virus circule déjà en permanence, de façon intense, comme aux États-Unis, en Israël ou en Roumanie, et il n'y a aucun besoin de réintroductions périodiques ; le changement climatique n'aura sans doute alors qu'un effet très limité. Ou bien, comme en Camargue, le virus ne circule qu'à très bas bruit ou disparaît entre deux flambées épidémiques, et la pérennisation de la maladie suppose des réintroductions périodiques – qui ont des chances de devenir moins intenses si certains oiseaux migrants se sédentarisent. C'est bien la preuve que toute maladie est un subtil équilibre entre des tendances contradictoires.

Pour clore cet inventaire, au demeurant bien incomplet, nous nous garderons d'oublier les infections transmises par des tiques, notamment la borréliose de Lyme, maladie à vecteur la plus répandue dans les zones tempérées de l'hémisphère nord et en forte progression depuis 1980. Si un meilleur diagnostic et un enregistrement plus rigoureux peuvent justifier une part de la progression observée, ils ne semblent en aucun cas constituer l'argument décisif. On peut plus sûrement

évoquer une modification du comportement des populations qui, durant leurs loisirs, pratiquent davantage d'activités de plein air dans les milieux forestiers infestés par les tiques. Nous ne saurions toutefois écarter totalement un effet direct des conditions climatiques sur l'habitat de ces acariens, donc sur leur densité, leur activité et leur agressivité. Deux constats militent en faveur d'un certain rôle du climat dans la dynamique épidémiologique. Le premier tient à la répartition saisonnière de l'apparition des signes cliniques, qui culmine en fin de printemps ou en début d'été et passe par un minimum très creusé en hiver. Le second est que la maladie de Lyme a récemment gagné de plus hautes latitudes : elle a en particulier été observée en Suède. Elle a également été retrouvée à de plus hautes altitudes : alors qu'elle ne se rencontrait auparavant qu'au-dessous de 700 mètres, elle est à plusieurs reprises montée à 1 100 ou 1 200 m en République tchèque, lors de périodes chaudes. En outre, là où elle était déjà bien implantée, le nombre de cas n'a cessé d'augmenter et la tendance pourrait encore s'amplifier, même s'il n'est pas exclu qu'une forte pluviosité du printemps exerce un effet antagoniste [114]. Dans l'est des États-Unis, qui concentre actuellement plus de 90 % des cas américains, il faut s'attendre à ce que la hausse des températures hivernales et printanières conduise à un début de transmission 0,4 à 0,5 semaine plus tôt qu'aujourd'hui dans les années 2025-2040 ($p < 0,05$), et 0,7 à 1,9 semaines plus tôt dans les années 2065-2080 ($p < 0,01$), voire 1,0 à 3,5 semaines plus tôt dans des États comme la Virginie et le Maryland [114]. Parallèlement, les tiques se reproduiraient davantage, ce qui conduirait à un accroissement de leur densité de 50 à 150 % (200 à 500 % au Canada) [115]. Dans l'avenir, des hivers plus cléments ont toutes les chances de favoriser la survie et la prolifération, non seulement des vecteurs, mais aussi de la bactérie responsable de la maladie : d'ici à 2050, en Amérique du Nord, *Borrelia burgdorferi* pourrait progresser en moyenne vers le nord de 3,5 à 11 km par an [116]. Mais des étés plus secs entraîneront chez les tiques une mortalité accrue, car le genre *Ixodes* a besoin d'une assez forte humidité. C'est dire combien reste ouverte la question des impacts possibles des modifications climatiques sur le devenir de la maladie de Lyme, surtout qu'il faudrait aussi tenir compte de l'évolution des populations de rongeurs sauvages (campagnols, mulots, etc.) et de cervidés (cerfs, chevreuils, daims, etc.), impliqués dans la circulation de la bactérie comme dans la maintenance des populations de tiques.

Risques et vulnérabilités

Les risques liés au changement climatique sont omniprésents. Mais il s'en faut de beaucoup que les impacts sanitaires correspondants soient partout identiques, même en présence d'aléas apparemment comparables. C'est que, pour des raisons biologiques,

comportementales, socio-économiques, technologiques, etc., les différentes régions et les différentes populations, ou sous-populations, présentent une inégale fragilité, une inégale susceptibilité, une inégale capacité de résistance – en un mot une inégale vulnérabilité. Certains auteurs [7, 117] ont été tentés de cartographier ce paramètre, par exemple en évaluant quelle pourrait être, à différentes échéances, la vulnérabilité des Européens face à l'évolution de la pathologie infectieuse induite par l'évolution du climat ; nous y découvrons qu'en 2035 aussi bien qu'en 2055, les Scandinaves et les habitants de l'Europe centrale devraient avoir la plus forte aptitude à faire face et à se maintenir en bonne santé. Il faut néanmoins insister sur le fait que les innombrables facteurs de vulnérabilité n'agissent jamais séparément, mais en étroite symbiose – si bien que leur résultante est toujours complexe.

Les régions à risques

Nous pouvons suivre en partie Patz *et al.* [5] pour identifier cinq types de régions présentant une vulnérabilité particulière :

- celles où les simulations prédisent le changement climatique le plus fort, l'exemple-type étant fourni par l'Arctique qui s'est déjà davantage réchauffée depuis quelques décennies que n'importe quelle autre région à la surface du globe. Cela ne peut manquer d'avoir des répercussions majeures sur la santé [118]. Certaines peuvent s'avérer positives (comme la réduction de la mortalité respiratoire et surtout cardiovasculaire du fait de la diminution du froid hivernal) et d'autres négatives. Mais, si le lien entre le réchauffement et la santé est parfois direct, il faut s'attendre dans la plupart des cas à des effets indirects, qui font intervenir l'accès plus difficile aux nourritures traditionnelles, le stress lié à la transformation du cadre de vie ou du mode de vie, et la contamination des aliments ou des eaux de boisson par des helminthes et toutes sortes d'autres micro-organismes pathogènes [119] ;
- celles qui sont situées à l'intérieur ou, plus encore, sur les marges des espaces de plus forte prévalence des maladies reconnues climato-dépendantes, comme le paludisme ;
- celles où une association est fréquemment observée entre éclosion de maladies diverses et extrêmes météorologiques ; nous pensons spécialement aux épidémies liées à l'*El Niño/Southern Oscillation* (ENSO), même si la place a manqué pour les évoquer ci-dessus ;
- celles où l'approvisionnement en eau et en nourriture risque d'être sérieusement compromis dans un futur plus ou moins proche, ce qui est notamment le cas des déserts chauds subtropicaux et de leur immédiate périphérie ;
- en dernier lieu, celles où la conjonction de divers stress environnementaux et socio-économiques réduit, ou réduira, la capacité des hommes à s'adapter. Si les épidémies ont de grandes chances d'être rapidement

jugulées dans les pays à hauts revenus, leur bilan pourra se révéler catastrophique dans les pays les plus démunis.

Les populations à risques

Les principaux facteurs de vulnérabilité proviennent de l'âge (aux deux extrémités de la vie) et de la précarité du statut économique ; nous y ajouterons, jusqu'à un certain point, le fait d'habiter une ville, et singulièrement une grande ville.

Pénalisés par un rapport surface/poids défavorable, par une médiocre capacité d'adaptation à la chaleur et par une certaine immaturité fonctionnelle, fortement dépendants des adultes et ayant des comportements qui les exposent à de nombreuses infections, notamment d'origine hydrique, les enfants (ou, en tout cas, les enfants des pays pauvres) figurent parmi les plus menacés par le réchauffement climatique [120]. Selon l'OMS, les moins de cinq ans supportent d'ores et déjà 80 % du fardeau (exprimé en années de vie perdues ajustées sur l'incapacité, ou DALY) pour les cinq causes de maladies les plus sensibles au climat (chaleur, diarrhée, malnutrition, paludisme, inondations) [2]. En outre, les trois causes de décès qui risquent d'être les plus majorées par le changement climatique (diarrhées, infections respiratoires, paludisme) seraient dès aujourd'hui responsables de plus de la moitié des décès survenant avant la fin de la cinquième année [11].

Pour des raisons à la fois physiologiques, socio-économiques et comportementales, les personnes âgées ressortent comme les principales cibles des vagues de chaleur et des autres grands paroxysmes météorologiques, mais aussi de la dégradation de la qualité de l'air et de certaines maladies infectieuses climato-sensibles [121]. Or, l'importance relative de cette tranche d'âge est appelée à aller croissant. Aux États-Unis, par exemple, les plus de 65 ans représentent actuellement 13 % de la population, mais ils verront leur taux grimper aux alentours de 20 % dès 2040, avec des concentrations maximales dans les zones côtières et les grandes métropoles susceptibles d'être les plus affectées par le changement climatique. Le vieillissement de la population va donc immanquablement multiplier les sujets à très haut risque [38]. En France, selon les projections les plus basses, le nombre de plus de 85 ans, qui ne dépassait pas 200 000 en 1950 et 1,2 millions en 2003, devrait atteindre 2 millions en 2020 et 3 millions en 2035, pour plafonner entre 4,5 et 5 millions en 2050. Cela signifie que, du seul fait de l'évolution démographique, une canicule comparable à celle de l'été 2003 pourrait faire au milieu de ce siècle quatre fois plus de victimes – soit aux alentours de 78 000 !

La grossesse est une autre période de vulnérabilité accrue à une large gamme de risques potentialisés par le changement climatique, tels que les fortes chaleurs et plusieurs maladies infectieuses (toxi-infections alimentaires et grippe un peu partout, paludisme dans les régions concernées, etc.) [7].

Le cas des populations urbaines (deux individus sur trois à la surface du globe en 2030) est plus ambigu. Certes, les citoyens ont souvent accès à un dispositif de soins de meilleure qualité qu'ailleurs [7]. Mais, dans les grandes agglomérations, ils subissent au plus haut point les méfaits des périodes caniculaires et enregistrent alors les plus fortes surmortalités [38, 39]. À moyen terme, les îlots de chaleur urbains risquent de devenir critiques pour les métropoles densément bâties et peu arborées : à Los Angeles, l'écart thermique entre le centre et la périphérie s'accroît désormais chaque année ; dans les quartiers centraux, la température dépasse aujourd'hui les 35 °C six jours par an, mais il faut s'attendre à 22 jours de dépassement d'ici à 2050, puis à 54 d'ici à 2100 ; les *heat islands* deviendront alors inévitablement des *death islands*. On ajoutera qu'environ 150 millions d'hommes, de femmes et d'enfants vivent actuellement dans des villes affectées par une pénurie chronique d'eau, et il est prévu que leur nombre passe vers 2050 à près d'un milliard [7].

Il n'empêche que ce sont les populations les plus misérables, dans les pays du Sud, qui seront inévitablement les plus touchées par les changements climatiques – lesquels vont exacerber chez elles les causes préexistantes de vulnérabilité, alors même que leurs capacités d'adaptation seront affaiblies [7]. Exposés aux conditions climatiques extrêmes et aux catastrophes naturelles, souffrant déjà des taux de sous-nutrition les plus élevés au monde, ne disposant que de moyens de subsistance très fortement dépendants des conditions climatiques et environnementales, les pauvres risquent de n'avoir d'autre choix que de recourir à des stratégies d'adaptation négatives (réduction de l'apport alimentaire, vente d'actifs productifs, etc.) qui entraveront leur capacité de résilience, aggraveront leur insécurité alimentaire et nutritionnelle, détérioreront leur état de santé et affaibliront plus encore leur aptitude à faire face aux chocs et stress climatiques. C'est donc vers les familles et les communautés les plus vulnérables, premières victimes du changement climatique, qu'il conviendrait d'orienter en priorité les politiques et programmes d'aide au développement.

Conclusion

Psychose irraisonnée ou légitime préoccupation écologique, en tout cas enjeu primordial de société et défi posé à la communauté internationale, la question du changement climatique et de ses effets sur la santé est devenue lancinante. D'un côté ont été brossés des scénarios apocalyptiques, allant jusqu'à envisager une amputation de notre espérance de vie de plusieurs années, voire en certains endroits de plusieurs dizaines d'années. De l'autre, soit qu'ils nient la perspective même

d'un changement climatique, soit qu'ils aient une foi inébranlable en la capacité de la science et de la médecine à surmonter tous les problèmes susceptibles de se poser, il est aussi des auteurs qui ont développé des thèses d'un optimisme béat : envers et contre tout, l'état de santé de l'humanité ne pourrait que progresser [97]. La réalité est sans doute à mi-chemin : tel qu'il est aujourd'hui attendu, et notamment du fait de sa rapidité supérieure à tout ce qui a été expérimenté jusque-là dans l'histoire de la vie [8], le changement climatique aura des répercussions peu contestables sur notre santé, et tout porte à penser que les impacts négatifs l'emporteront sur les effets positifs.

Tableau 1. Degré de confiance des principaux impacts sanitaires du changement climatique, en partie d'après [7].

Table 1. Confidence levels for the main health impacts of climate change, partly from [7].

Degré de confiance	Impact sanitaire
Très élevé	Exacerbation jusqu'au milieu du ^{xxi} siècle de problèmes sanitaires déjà existants
	Risque accru de blessures, de maladies et de décès dus aux vagues de chaleur plus intenses et aux incendies de végétation plus fréquents
	Risque accru de maladies nutritionnelles et à transmission hydrique
Élevé	Impact sanitaire majoré dans les groupes humains les plus pauvres et chez les individus déjà en mauvaise santé
	Extension de certaines maladies existantes au-delà de leur aire antérieure de distribution
	Risque accru de sous-nutrition résultant d'une baisse de la production agricole dans les régions les plus pauvres
	Impact sanitaire d'une réduction de la capacité de travail et d'une moindre productivité dans les populations vulnérables
Moyen à élevé	Impact sanitaire réduit, mais non nul, sur les populations à haut niveau socio-économique
	Neutralisation croissante des effets positifs du changement climatique par l'ampleur et la sévérité de ses effets négatifs
Moyen	Apparition à partir du milieu du ^{xxi} siècle de problèmes sanitaires jusque-là inconnus
	Risque accru de maladies infectieuses ou parasitaires à transmission vectorielle
	Nouvelle répartition géographique de la production agricole, entraînant une perturbation des régimes alimentaires
Faible	Moindre capacité des vecteurs à transmettre certaines maladies du fait du franchissement de seuils thermiques
	Réduction de la morbidité et de la mortalité dues au froid, en raison de la moindre occurrence des vagues de froid

Mais les incertitudes sont encore nombreuses (*tableau 1*) et, pour beaucoup, difficilement réductibles – moins d’ailleurs en ce qui concerne la nature des évolutions attendues qu’à propos de leur amplitude [98, 122]. D’une part, l’avenir est par essence incertain [123] et, même si la marge d’incertitude tend à se réduire, bien des doutes subsistent quant à l’évolution à venir du climat, ne serait-ce qu’en raison des inconnues concernant les comportements humains et les grands choix énergétiques. D’autre part, « *les prédictions sont aussi difficiles en matière médicale qu’elles le sont en matière climatique et une telle analyse n’est évidemment possible qu’en se basant sur ce que nous pouvons observer pour le moment lors des variations saisonnières courantes ou imprévues de la température externe* » [8]. Enfin, et surtout, il ne faut pas oublier que les liens entre le climat et la santé sont complexes, multiformes et largement modulés par l’organisation des sociétés. On se retrouve couramment en présence d’équations à plusieurs dizaines, voire à plusieurs centaines d’inconnues – que personne n’est, et ne sera avant longtemps, capable de résoudre. Les variables météorologiques ne suffisent pas à cerner les risques météoropathologiques et une même agression climatique n’est pas ressentie de la même façon dans différents milieux économiques ou culturels. L’accroissement incontrôlé de la population mondiale, l’urbanisation anarchique et l’augmentation continue des échanges jouent un rôle décisif, qui interfère constamment avec celui du changement climatique. Si les progrès réalisés dans la prévention et/ou le traitement des maladies ont des chances d’annihiler certains des effets nocifs que nous avons signalés, il faut garder à l’esprit que l’élévation de la

température peut exacerber les problèmes sanitaires des groupes humains les plus vulnérables. Or, d’une façon générale, les risques majeurs sont concentrés dans les pays les plus pauvres, ceux-là mêmes qui ont la plus faible capacité d’adaptation et de réaction. En somme, il ne faut jamais oublier qu’une dégradation de l’état de santé résulte toujours de la convergence d’un aléa exogène et d’une particulière vulnérabilité de la population exposée.

Dans ces conditions, plutôt que de s’en tenir à un scénario unique d’évolution, les projections sur les impacts sanitaires du changement climatique devraient à l’avenir s’efforcer de cerner tout « l’éventail des possibles », donc d’établir différents scénarios d’évolution, tenant le plus grand compte du contexte [123]. En outre, nous ne dissimulerons pas que bien d’autres impacts sanitaires auraient pu être signalés : certains auteurs commencent, par exemple, à s’intéresser à d’éventuels effets du changement climatique sur les cancers [4], avec des localisations aussi variées que la peau, le poumon, le sein (risque accru) ou la thyroïde (risque diminué) [124]. Finalement, quel que soit l’impact sanitaire du changement climatique, le surcoût qu’il occasionnera pour la collectivité sera lourd, difficilement supportable par les pays en développement, mais aussi par les pays les plus avancés – ce qui suggère que, même du strict point de vue économique, les mesures de mitigation et d’adaptation susceptibles d’être prises seraient hautement rentables. ■

Remerciements et autres mentions

Financement : aucun ; **liens d’intérêt :** aucun.

Références

1. Bashford A, Tracy SW. Modern airs, waters, and places. *Bull Hist Med* 2012 ; 86 : 495-514. doi: 10.1353/bhm.2012.0084
2. OMS-OMM. *Atlas de la santé et du climat*. Genève : OMM-OMS, 2012. <http://www.who.int/globalchange/publications/atlas/report/fr/>
3. Franchini M, Mannucci PM. Impact on human health of climate changes. *Eur J Intern Med* 2015 ; 26 : 1-5. doi: 10.1016/j.ejim.2014.12.008
4. Kim KH, Kabir E, Jahan SA. A review of the consequences of global climate change on human health. *J Environ Sci Health C* 2014 ; 32 : 299-318. doi: 10.1080/10590501.2014.941279
5. Patz JA, Grabow ML, Limaye VS. When it rains, it pours: future climate extremes and health. *Ann Glob Health* 2014 ; 80 : 332-44. doi: 10.1016/j.aogh.2014.09.007
6. Patz JA, Frumkin H, Holloway T, Vimont DJ, Haines A. Climate change: challenges and opportunities for global health. *JAMA* 2014 ; 312 : 1565-80. doi: 10.1001/jama.2014.13186
7. Smith KR, Woodward A, Campbell-Lendrum DD, et al. Human health: impacts, adaptation, and co-benefits. In: Field CB, Barros VR, Dokken DJ, et al., eds. *Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability. Part A: Global and sectoral aspects*. Cambridge-New York: Cambridge University Press, 2014. <http://ehsdiv.sph.berkeley.edu/krsmith/?p=1670>.
8. Swynghedauw B. Conséquences médicales des variations de la température ambiante et des variations climatiques. *Bull Acad Natl Med* 2012 ; 196 : 201-15. <http://www.academie-medecine.fr/wp-content/uploads/2013/03/2012.1.pdf>
9. Braks M, van Ginkel R, Wint W, Sedda L, Sprong H. Climate change and public health policy: translating the science. *Int J Environ Res Public Health* 2013 ; 11 : 13-29. doi: 10.3390/ijerph110100013
10. Krueger J, Biedrzycki P, Hoverter SP. Human health impacts of climate change: implications for the practice and law of public health. *J Law Med Ethics* 2015 ; 43 (S1) : 79-82. doi: 10.1111/jlme.12223

11. Hales S, Kovats S, Lloyd S, Campbell-Lendrum D, eds. *Quantitative risk assessment of the effects of climate change on selected causes of death, 2030s and 2050s*. Geneva : WHO, 2014. http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/134014/1/9789241507691_eng.pdf?ua=1
12. McMichael AJ. Globalization, climate change and health. *N Engl J Med* 2013 ; 368 : 1335-43. doi: 10.1056/NEJMra1109341
13. Handmer J, Honda Y, Kundzewicz ZW, et al. Changes in impacts of climate extremes: human systems and ecosystems. In : Field CB, Barros V, Stocker TF, et al., editors. *Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation..* Cambridge-New York : Cambridge University Press, 2012. http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srex/SREX-Chap4_FINAL.pdf
14. Goodess CM. How is the frequency, location and severity of extreme events likely to change up to 2060? *Environ Sci Policy* 2013 ; 27 : S4-14. doi: 10.1016/j.envsci.2012.04.001
15. Ma W, Wang L, Lin H, et al. The temperature-mortality relationship in China: an analysis from 66 Chinese communities. *Environ Res* 2015 ; 137 : 72-7. doi: 10.1016/j.envres.2014.11.016
16. Ye X, Wolff R, Yu W, Vaneckova P, Pan X, Tong S. Ambient temperature and morbidity: a review of epidemiological evidence. *Environ Health Perspect* 2012 ; 120 : 19-28. doi: 10.1289/ehp.1003198
17. Li M, Gu S, Bi P, Yang J, Liu Q. Heat waves and morbidity: current knowledge and further direction: a comprehensive literature review. *Int J Environ Res Public Health* 2015 ; 12 : 5256-83. doi: 10.3390/ijerph120505256
18. Petkova EP, Bader DA, Anderson GB, Horton RM, Knowlton K, Kinney PL. Heat-related mortality in a warming climate: projections for 12 U.S. cities. *Int J Environ Res Public Health* 2014 ; 11 : 11371-83. doi: 10.3390/ijerph111111371
19. Hajat S, Vardoulakis S, Heaviside C, Eggen B. Climate change effects on human health: projections of temperature-related mortality for the UK during the 2020s, 2050s and 2080s. *J Epidemiol Community Health* 2014 ; 68 : 641-8. doi: 10.1136/jech-2013-202449
20. Lundgren K, Kuklane K, Gao C, Holmér I. Effects of heat stress on working populations when facing climate change. *Ind Health* 2013 ; 51 : 3-15.
21. Huang C, Barnett AG, Xu Z, et al. Managing the health effects of temperature in response to climate change: challenges ahead. *Environ Health Perspect* 2013 ; 121 : 415-9. doi: 10.1289/ehp.1206025
22. Honda Y, Kondo M, McGregor G, et al. Heat-related mortality risk model for climate change impact projection. *Environ Health Prev Med* 2014 ; 19 : 56-63. doi: 10.1007/s12199-013-0354-6
23. De Blois J, Kjellstrom T, Agewall S, Ezekowitz JA, Armstrong PW, Atar D. The effects of climate change on cardiac health. *Cardiology* 2015 ; 131 : 209-17. doi: 10.1159/000398787
24. Bhaskaran K, Armstrong B, Hajat S, Haines A, Wilkinson P, Smeeth L. Heat and risk of myocardial infarction: hourly level case-crossover analysis of MINAP database. *Br Med J* 2012 ; 345 : e8050. doi: 10.1136/bmj.e8050
25. Takaro TK, Knowlton K, Balmes JR. Climate change and respiratory health: current evidence and knowledge gaps. *Expert Rev Resp Med* 2013 ; 7 : 349-61. doi: 10.1586/17476348.2013.814367
26. Gerardi DA, Kellerman RA. Climate change and respiratory health. *J Occup Environ Med* 2014 ; 56 (Suppl 10) : S49-54. doi: 10.1097/JOM.0000000000000292
27. Bernstein AS, Rice MB. Lungs in a warming world: climate change and respiratory health. *Chest* 2013 ; 143 : 1455-9. doi: 10.1378/chest.12-2384
28. Lin S, Hsu WH, Van Zutphen AR, Saha S, Lubber G, Hwang SA. Excessive heat and respiratory hospitalizations in New York State: estimating current and future public health burden related to climate change. *Environ Health Perspect* 2012 ; 120 : 1571-7. doi: 10.1289/ehp.1104728
29. Hansen J, Sato M, Ruedy R. Perception of climate change. *Proc Natl Acad Sci U S A* 2012 ; 109 : E2415-23. doi: 10.1073/pnas.1205276109
30. Christidis N, Jones GS, Stott PA. Dramatically increasing chance of extremely hot summers since the 2003 European heatwave. *Nat Clim Change* 2015 ; 5 : 46-50. doi: 10.1038/nclimate2468
31. Åström DO, Schifano P, Asta F, et al. The effect of heat waves on mortality in susceptible groups: a cohort study of a mediterranean and a northern European City. *Environ Health* 2015 ; 14 : 30. doi: 10.1186/s12940-015-0012-0
32. Laaidi K, Ung A, Pascal M, Beaudou P. Vulnérabilité à la chaleur : actualisation des connaissances sur les facteurs de risque. *Bull Epidemiol Hebd* 2015 ; 5 : 76-82. http://www.invs.sante.fr/beh/2015/5/2015_5_1.html
33. Leone M, D'Ippoliti D, De Sario M, et al. A time series study on the effects of heat on mortality and evaluation of heterogeneity into european and eastern-southern Mediterranean cities: results of the EU CIRCE project. *Environ Health* 2013 ; 12 : 55. doi: 10.1186/1476-069X-12-55
34. Xu Z, Sheffield PE, Su H, Wang X, Bi Y, Tong S. The impact of heat waves on children's health: a systematic review. *Int J Biometeorol* 2014 ; 58 : 239-47. doi: 10.1007/s00484-013-0655-x
35. Hansen A, Bi L, Saniotis A, Nitschke M. Vulnerability to extreme heat and climate change: is ethnicity a factor? *Glob Health Action* 2013 ; 6 : 21364. doi: 10.3402/gha.v6i0.21364
36. Zhang K, Rood RB, Michailidis G, et al. Comparing exposure metrics for classifying 'dangerous heat' in heat wave and health warning systems. *Environ Int* 2012 ; 46 : 23-9. doi: 10.1016/j.envint.2012.05.001
37. Saha MV, Davis RE, Hondula DM. Mortality displacement as a function of heat event strength in 7 US cities. *Am J Epidemiol* 2014 ; 179 : 467-74. doi: 10.1093/aje/kwt26410.1097/EDE.0b013e3182949ae7
38. Ebi K, Berry P, Campbell-Lendrum D, et al. *Protecting health from climate change: vulnerability and adaptation assessment*. Geneva : World Health Organization, 2013. http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/104200/1/9789241564687_eng.pdf?ua=1
39. Bobb JF, Peng RD, Bell ML, Dominici F. Heat-related mortality and adaptation to heat in the United States. *Environ Health Perspect* 2014 ; 122 : 811-6. doi: 10.1289/ehp.1307392
40. Toloo G, FitzGerald G, Aitken P, Verrall K, Tong S. Are heat warning systems effective? *Environ Health* 2013 ; 12 : 1-4. doi: 10.1186/1476-069x-12-27
41. Bittner MI, Matthies EF, Dalbokova D, Menne B. Are European countries prepared for the next big heat-wave? *Eur J Public Health* 2014 ; 24 : 615-9. doi: 10.1093/eurpub/ckt121
42. Petkova EP, Morita H, Kinney PL. Health impacts of heat in a changing climate: how can emerging science inform urban adaptation planning? *Curr Epidemiol Rep* 2014 ; 1 : 67-74. doi: 10.1007/s40471-014-0009-1
43. Vardoulakis S, Heaviside C, editors. *Health effects of climate change in the UK 2012*. London : Health Protection Agency, 2012. <http://www.hpa.org.uk/hecc2012>

44. Bennett CM, Dear KB, McMichael AJ. Shifts in the seasonal distribution of deaths in Australia, 1968-2007. *Int J Biometeorol* 2014 ; 58 : 835-42. doi: 10.1007/s00484-013-0663-x
45. Ebi KL, Mills D. Winter mortality in a warming climate: a reassessment. *Wiley Interdiscipl Rev Clim Change* 2013 ; 4 : 203-12. doi: 10.1002/wcc.211
46. Barnett AG, Hajat S, Gasparrini A, Rocklöv J. Cold and heat waves in the United States. *Environ Res* 2012 ; 112 : 218-24. doi: 10.1016/j.envres.2011.12.010
47. Staddon PL, Montgomery HE, Depledge MH. Climate warming will not decrease winter mortality. *Nat Clim Change* 2014 ; 4 : 190-4. doi: 10.1038/nclimate2121
48. Kinney P, Pascal M, Vautard R, Laaidi K. La mortalité hivernale va-t-elle diminuer avec le changement climatique ? *Bull Epidemiol Hebd* 2012 ; 12-13 : 5-7. <http://www.invs.sante.fr/Publications-et-outils/BEH-Bulletin-epidemiologique-hebdomadaire/Archives/2012/BEH-n-12-13-2012>
49. Li T, Horton RM, Kinney PL. Projections of seasonal patterns in temperature-related deaths for Manhattan, New York. *Nat Clim Change* 2013 ; 3 : 717-21. doi: 10.1038/nclimate1902
50. Martin SL, Cakmak S, Hebborn CA, Avramescu ML, Tremblay N. Climate change and future temperature-related mortality in 15 Canadian cities. *Int J Biometeorol* 2012 ; 56 : 605-19. doi: 10.1007/s00484-011-0449-y
51. Mori M, Watanabe M, Shioyama H, Inoue J, Kimoto M. Robust Arctic sea-ice influence on the frequent Eurasian cold winters in past decades. *Nat Geosci* 2014 ; 7 : 869-73. doi: 10.1038/ngeo2277
52. Oppenheimer M, Campos M, Birkmann J, et al. Emergent risks and key vulnerabilities. In: Field CB, Barros VR, Dokken DJ, et al., eds. *Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability. Part A: Global and sectoral aspects*. Cambridge-New York: Cambridge University Press, 2014. https://ipcc-wg2.gov/AR5/images/uploads/WGIIAR5-Chap19_FINAL.pdf.
53. Hirabayashi Y, Roobavannan M, Sujun K, et al. Global flood risk under climate change. *Nat Clim Change* 2013 ; 3 : 816-21. doi: 10.1038/nclimate1911
54. Kundzewicz ZW, Kanae S, Seneviratne SI, et al. Flood risk and climate change: global and regional perspectives. *Hydrol Sci J* 2014 ; 59 : 1-28. doi: 10.1080/02626667.2013.857411
55. Guha-Sapir D, Hoyois P, Below R. *Annual disaster statistical review 2013: the numbers and trends*. Brussels : CRED, 2014. http://www.disasters.ir/files/ADSR_2013.pdf
56. Stanke C, Kerac C, Prudhomme C, Medlock J, Murray V. Health effects of drought: a systematic review of the evidence. *PLoS Curr Disaster* 2013 ; 5. doi: 10.1371/currents.dis.7a2cee9e980f91ad7697b570bcc4b004
57. Goldmann E, Galea S. Mental health consequences of disasters. *Annu Rev Public Health* 2014 ; 35 : 169-83. doi: 10.1146/annurev-publhealth-032013-182435
58. Paxson C, Fussell E, Rhodes J, Waters M. Five years later: recovery from post traumatic stress and psychological distress among low-income mothers affected by Hurricane Katrina. *Soc Sci Med* 2012 ; 74 : 150-7. doi: 10.1016/j.socscimed.2011.10.004
59. Johnston FH, Henderson SB, Chen Y, et al. Estimated global mortality attributable to smoke from landscape fires. *Environ Health Perspect* 2012 ; 120 : 695-701. doi: 10.1289/ehp.1104422
60. McKenzie D, Shankar U, Keane RE, et al. Smoke consequences of new wildfire regimes driven by climate change. *Earth's Future* 2014 ; 2 : 1-25. doi: 10.1002/2013EF000180
61. Porter JR, Xie L, Andrew J, Challinor AJ, et al. Food security and food production systems. In: Field CB, Barros VR, Dokken DJ, et al., eds. *Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability. Part A: Global and sectoral aspects*. Cambridge-New York: Cambridge University Press, 2014. http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg2/WGIIAR5-Chap7_FINAL.pdf.
62. McMichael AJ, Butler CD, Dixon J. Climate change, food systems and population health risks in their eco-social context. *Public Health* 2015. doi: 10.1016/j.puhe.2014.11.013 (In press).
63. Wheeler T, von Braun J. Climate change impacts on global food security. *Science* 2013 ; 341 : 508-13. doi: 10.1126/science.1239402
64. Grace K, Davenport F, Funk C, Lerner AM. Child malnutrition and climate in Sub-Saharan Africa: an analysis of recent trends in Kenya. *Appl Geogr* 2012 ; 35 : 405-13. doi: 10.1016/j.apgeog.2012.06.017
65. Husband A. Climate change and the role of food price in determining obesity risk. *Am J Public Health* 2013 ; 103 : e2. doi: 10.2105/AJPH.2012.301084
66. Lake IR, Hooper L, Abdelhamid A, et al. Climate change and food security: health impacts in developed countries. *Environ Health Perspect* 2012 ; 120 : 1520-6. doi: 10.1289/ehp.1104424
67. Myers SS, Zanolotti A, Kloog I, et al. Increasing CO₂ threatens human nutrition. *Nature* 2014 ; 510 : 139-42. doi: 10.1038/nature13179
68. Jiménez Cisneros BE, Oki T, Arnell NW, et al. Freshwater resources. In: Field CB, Barros VR, Dokken DJ, et al., eds. *Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability. Part A: Global and sectoral aspects*. Cambridge-New York : Cambridge University Press, 2014. http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg2/WGIIAR5-Chap3_FINAL.pdf.
69. Cann KF, Thomas DR, Salmon RL, Wyn-Jones AP, Kay D. Extreme water-related weather events and waterborne disease. *Epidemiol Infect* 2013 ; 141 : 671-86. doi: 10.1017/S0950268812001653
70. Coffey R, Benham B, Krometis LA, Wolfe ML, Cummins E. Assessing the effects of climate change on waterborne microorganisms: implications for EU and US water policies. *Hum Ecol Risk Assess* 2014 ; 20 : 724-42. doi: 10.1080/10807039.2013.802583
71. de Man H, van den Berg HH, Leenen EJ, et al. Quantitative assessment of infection risk from exposure to waterborne pathogens in urban floodwater. *Water Res* 2014 ; 48 : 90-9. doi: 10.1016/j.watres.2013.09.022
72. Guzman Herrador BR, de Blasio BF, MacDonald E, et al. Analytical studies assessing the association between extreme precipitation or temperature and drinking water-related waterborne infections: a review. *Environ Health* 2015 ; 14 : 29. doi: 10.1186/s12940-015-0014-y
73. Sterk A, Schijven J, de Nijs T, de Roda Husman AM. Direct and indirect effects of climate change on the risk of infection by water-transmitted pathogens. *Environ Sci Technol* 2013 ; 47 : 12648-60. doi: 10.1021/es403549s
74. Von Schneidmesser E, Monks PS. Air quality and climate – synergies and trade-offs. *Environ Sci Process Impact* 2013 ; 15 : 1315-25. doi: 10.1039/c3em00178d
75. De Sario M, Katsouyanni K, Michelozzi P. Climate change, extreme weather events, air pollution and respiratory health in Europe. *Eur Respir J* 2013 ; 42 : 826-43. doi: 10.1183/09031936.00074712
76. Analitis A, Michelozzi P, D'Ippoliti D, et al. Effects of heat waves on mortality: effect modification and confounding by air pollutants. *Epidemiology* 2014 ; 25 : 15-22. doi: 10.1097/EDE.0b013e31828ac01b

77. Fang Y, Mauzerall DL, Liu J, Fiore AM, Horowitz LW. Impacts of 21st century climate change on global air pollution-related premature mortality. *Clim Change* 2013 ; 121 : 239-53. doi: 10.1007/s10584-013-0847-8
78. Benmarhnia T, Oulhote Y, Petit C, et al. Chronic air pollution and social deprivation as modifiers of the association between high temperature and daily mortality. *Environ Health* 2014 ; 13 : 53. doi: 10.1186/1476-069X-13-53
79. Pascal M, Corso M, Chanel O, et al. Assessing the public health impacts of urban air pollution in 25 European cities: results of the Aphekom project. *Sci Total Environ* 2013 ; 449 : 390-400. doi: 10.1016/j.scitotenv.2013.01.077.4
80. Pakpour S, Li DW, Klironomos J. Relationships of fungal spore concentrations in the air and meteorological factors. *Fungal Ecol* 2015 ; 13 : 130-4. doi: 10.1016/j.funeco.2014.09.008
81. Damialis A, Vokou D, Gioulekas D, Halley JM. Long-term trends in airborne fungal-spore concentrations: a comparison with pollen. *Fungal Ecol* 2015 ; 13 : 150-6. doi: 10.1016/j.funeco.2014.09.010
82. Besancenot JP, Thibaudon M. Changement climatique et pollinisation. *Rev Mal Respir* 2012 ; 29 : 1238-53. doi: 10.1016/j.rmr.2012.07.007
83. Zhang Y, Bielory L, Mi Z, Cai T, Robock A, Georgopoulos P. Allergenic pollen season variations in the past two decades under changing climate in the United States. *Glob Change Biol* 2015 ; 21 : 1581-9. doi: 10.1111/gcb.12755
84. Pashley CH, Satchwell J, Edwards RE. Ragweed pollen: is climate change creating a new aeroallergen problem in the UK? *Clin Exp Allergy* 2015 ; 45 : 1262-5. doi: 10.1111/cea.12572
85. Albertine JM, Manning WJ, DaCosta M, Stinson KA, Muilenberg ML, Rogers CA. Projected carbon dioxide to increase grass pollen and allergen exposure despite higher ozone levels. *PLoS ONE* 2014 ; 9 : e111712. doi: 10.1371/journal.pone.0111712
86. Ebi KL, Lindgren E, Suk JE, Semenza JC. Adaptation to the infectious disease impacts of climate change. *Clim Change* 2013 ; 118 : 355-65. doi: 10.1007/s10584-012-0648-5
87. Rodó X, Pascual M, Doblas-Reyes FJ, et al. Climate change and infectious diseases: can we meet the needs for better prediction? *Clim Change* 2013 ; 118 : 625-40. doi: 10.1007/s10584-013-0744-1
88. Medlock JM, Leach SA. Effect of climate change on vector-borne disease risk in the UK. *Lancet Infect Dis* 2015 ; 15 : 721-30. doi: 10.1016/S1473-3099(15)70091-5
89. Altizer S, Ostfeld RS, Johnson PT, Kutz S, Harvell CD. Climate change and infectious diseases: from evidence to a predictive framework. *Science* 2013 ; 341 : 514-9. doi: 10.1126/science.1239401
90. Heffernan C. The climate change-infectious disease nexus: is it time for climate change syndemics? *Anim Health Res Rev* 2013 ; 14 : 151-60. doi: 10.1017/S1466252313000133
91. Campbell-Lendrum D, Manga L, Bagayoko M, Sommerfeld J. Climate change and vector-borne diseases: what are the implications for public health research and policy? *Phil Trans R Soc B* 2015 ; 370 : 20130552. doi: 10.1098/rstb.2013.0552
92. Rochlin I, Ninivaggi DV, Hutchinson ML, Farajollahi A. Climate change and range expansion of the Asian tiger mosquito (*Aedes albopictus*) in Northeastern USA: implications for public health practitioners. *PLoS ONE* 2013 ; 8 : e60874. doi: 10.1371/journal.pone.0060874
93. Thomas SM, Tjaden NB, van den Bos S, Beierkuhnlein C. Implementing cargo movement into climate based risk assessment of vector-borne diseases. *Int J Environ Res Public Health* 2014 ; 11 : 3360-74. doi: 10.3390/ijerph110303360
94. Waldock J, Chandra NL, Lelieveld J, et al. The role of environmental variables on *Aedes albopictus* biology and chikungunya epidemiology. *Pathog Glob Health* 2013 ; 107 : 224-41. doi: 10.1179/2047773213Y.00000000100
95. Caminade C, Kovats S, Rocklöv J, et al. Impact of climate change on global malaria distribution. *Proc Natl Acad Sci U S A* 2014 ; 111 : 3286-91. doi: 10.1073/pnas.1302089111
96. Siraj AS, Santos-Vega M, Bouma MJ, Yadeta D, Ruiz Carrascal D, Pascual M. Altitudinal changes in malaria incidence in highlands of Ethiopia and Colombia. *Science* 2014 ; 343 : 1154-8. doi: 10.1126/science.1244325
97. Anstey MH. Climate change and health – what's the problem? *Global Health* 2013 ; 9 : 4. doi: 10.1186/1744-8603-9-4
98. Grasso M, Manera M, Chiabai A, Markandya A. The health effects of climate change: a survey of recent quantitative research. *Int J Environ Res Public Health* 2012 ; 9 : 1523-47. doi: 10.3390/ijerph9051523
99. Yamana TK, Eltahir E. Projected impacts of climate change on environmental suitability for malaria transmission in West Africa. *Environ Health Perspect* 2013 ; 121 : 1179-86. doi: 10.1289/ehp.1206174
100. Ermert V, Fink AH, Paeth H. The potential effects of climate change on malaria transmission in Africa using bias-corrected regionalized climate projections and a simple malaria seasonality model. *Clim Change* 2013 ; 120 : 741-54. doi: 10.1007/s10584-013-0851-z
101. Beck-Johnson LM, Nelson WA, Paaijmans KP, Read AF, Thomas MB, Bjornstad ON. The effect of temperature on *Anopheles* mosquito population dynamics and the potential for malaria transmission. *PLoS ONE* 2013 ; 8 : e79276. doi: 10.1371/journal.pone.0079276
102. Mordecai EA, Paaijmans KP, Johnson LR, et al. Optimal temperature for malaria transmission is dramatically lower than previously predicted. *Ecol Lett* 2013 ; 16 : 22-30. doi: 10.1111/ele.12015
103. Rogers DJ. Dengue: recent past and future threats. *Phil Trans R Soc B* 2015 ; 370 : 20130562. doi: 10.1098/rstb.2013.0562
104. Bouzid M, Colón-González FJ, Lung T, Lake IR, Hunter PR. Climate change and the emergence of vector-borne diseases in Europe: case study of dengue fever. *BMC Public Health* 2014 ; 14 : 781. doi: 10.1186/1471-2458-14-781
105. Murray NE, Quam MB, Wilder-Smith A. Epidemiology of dengue: past, present and future prospects. *Clin Epidemiol* 2013 ; 5 : 299-309. doi: 10.2147/CLEP.S34440
106. Åström C, Rocklöv J, Hales S, Béguin A, Louis V, Sauerborn R. Potential distribution of dengue fever under scenarios of climate change and economic development. *Ecohealth* 2012 ; 9 : 448-54. doi: 10.1007/s10393-012-0808-0
107. Colón-González FJ, Fezzi C, Lake IR, Hunter PR. The effects of weather and climate change on dengue. *PLoS Negl Trop Dis* 2013 ; 7 : 2503-13. doi: 10.1371/journal.pntd.0002503
108. Fischer D, Thomas SM, Suk JE, et al. Climate change effects on Chikungunya transmission in Europe: geospatial analysis of vector's climatic suitability and virus' temperature requirements. *Int J Health Geogr* 2013 ; 12 : 51. doi: 10.1186/1476-072X-12-51
109. Meason B, Paterson R. Chikungunya, climate change, and human rights. *Health Hum Rights* 2014 ; 16 : 105-12.

<http://www.hhrjournal.org/wp-content/uploads/sites/13/2014/06/Meason.pdf>

110. Paz S. Climate change impacts on West Nile virus transmission in a global context. *Phil Trans R Soc B* 2015 ; 370 : 20130561. doi: 10.1098/rstb.2013.0561

111. Harrigan RJ, Thomassen HA, Buermann W, Smith TB. A continental risk assessment of West Nile virus under climate change. *Glob Change Biol* 2014 ; 20 : 2417-25. doi: 10.1111/gcb.12534

112. Chen CC, Jenkins E, Epp T, Waldner C, Curry PS, Soos C. Climate change and West Nile virus in a highly endemic region of North America. *Int J Environ Res Public Health* 2013 ; 10 : 3052-71. doi: 10.3390/ijerph10073052

113. Jiménez-Clavero MÁ. Animal viral diseases and global change: bluetongue and West Nile fever as paradigms. *Front Genet* 2012 ; 3 : 105. doi: 10.3389/fgene.2012.00105

114. Monaghan AJ, Moore SM, Sampson KM, Beard CB, Eisen RJ. Climate change influences on the annual onset of Lyme disease in the United States. *Ticks Tick Borne Dis* 2015 ; pii : S1877-959X (15)00087-4. doi: 10.1016/j.ttbdis.2015.05.005

115. Ogden NH, Radojević M, Wu X, Duvvuri VR, Leighton PA, Wu J. Estimated effects of projected climate change on the basic reproductive number of the Lyme disease vector *Ixodes scapularis*. *Environ Health Perspect* 2014 ; 122 : 631-8. doi: 10.1289/ehp.1307799

116. Simon JA, Marrotte RR, Desrosiers N, *et al.* Climate change and habitat fragmentation drive the occurrence of *Borrelia burgdorferi*, the agent of Lyme disease, at the northeastern limit

of its distribution. *Evol Appl* 2014 ; 7 : 750-64. doi: 10.1111/eva.12165

117. Suk JE, Ebi KL, Vose D, *et al.* Indicators for tracking European vulnerabilities to the risks of infectious disease transmission due to climate change. *Int J Environ Res Public Health* 2014 ; 11 : 2218-35. doi: 10.3390/ijerph110202218

118. Rynor B. Climate change poses health threats in Arctic. *CMAJ* 2012 ; 184 : E33-4. doi: 10.1503/cmaj.109-4053

119. Dobson A, Molnár PK, Kutz S. Climate change and Arctic parasites. *Trends Parasitol* 2015 ; 31 : 181-8. doi: 10.1016/j.pt.2015.03.006

120. Kiang K, Graham S, Farrant B. Climate change, child health and the role of the paediatric profession in under-resourced settings. *Trop Med Int Health* 2013 ; 18 : 1053-6. doi: 10.1111/tmi.12153

121. Gamble JL, Hurley BJ, Schultz PA, Jaglom WS, Krishnan N, Harris M. Climate change and older Americans: state of the science. *Environ Health Perspect* 2013 ; 121 : 15-22. doi: 10.1289/ehp.1205223

122. Wardekker JA, de Jong A, van Bree L, Turkenburg WC, van der Sluijs JP. Health risks of climate change: an assessment of uncertainties and its implications for adaptation policies. *Environ Health* 2012 ; 11 : 67. doi: 10.1186/1476-069X-11-67

123. Ebi KL. Health in the new scenarios for climate change research. *Int J Environ Res Public Health* 2013 ; 11 : 30-46. doi: 10.3390/ijerph110100030

124. Lehrer S, Rosenzweig KE. Cold climate is a risk factor for thyroid cancer. *Clin Thyroidol* 2014 ; 26 : 273-6.

IN PRESS