

# Impacts sur l'épidémiologie des maladies infectieuses et risques épidémiques émergents

Jean-François Guégan<sup>1,2</sup>

Disponible sur internet le :

1. Université de Montpellier, UMR MIVEGEC, IRD, CNRS, 911, avenue Agropolis, BP 64501, 34394 Montpellier cedex 5, France
2. Université de Montpellier, campus international de Baillarguet, UMR ASTRE, INRAE, Cirad, 34398 Montpellier cedex 5, France

jean-francois.guegan@inrae.fr

## Impacts on the epidemiology of infectious diseases and emerging epidemic risks

### ■ Résumé

Il existe une relation très étroite entre les êtres humains, les animaux et les écosystèmes dont ils font partie. Le climat est une composante essentielle à la survie et au bon développement des espèces, y compris l'Humain. Si, au XIX<sup>e</sup> siècle, hygiénistes et aéristes s'affrontaient sur la nature dynamique des microbes, les dérèglements climatiques actuels nous interrogent quant à leurs conséquences sanitaires possibles ou attendues. Dans cet article, je montre comment le sujet des changements climatiques et de ses impacts sur les maladies infectieuses et parasitaires a pris une tournure exagérée, souvent par manque d'approches interdisciplinaires et de considération des conditions environnementales et sociales à l'origine des infections et parasitoses. Si l'on s'accorde aujourd'hui à accepter l'importance du climat et de son évolution, pour expliquer les limites d'aires géographiques d'agents infectieux et parasitaires et de leurs contraintes, les interactions locales, entre naturalité, pratiques humaines et développement socioéconomiques, constituent la source de leur émergence et le moteur de leur propagation possible.

## Introduction

Aujourd'hui, la santé publique dépasse le simple cadre des préoccupations d'hygiène, de pollution de l'eau et de l'air, ou des produits toxiques, pour s'intéresser aux bouleversements écologiques que connaît notre planète. Les changements environnementaux globaux sont causés par les systèmes sociaux et économiques et, en particulier, la croissance démographique, l'urbanisation, le développement économique et industriel, le progrès technologique, ainsi que les changements sociaux et les valeurs collectives nées de ces forces. Parmi ces changements planétaires, les dérèglements climatiques sont devenus, ces 20 à 30 dernières années, une priorité de santé publique internationale eu égard aux dangers sanitaires qu'ils peuvent faire encourir aux populations humaines. Augmentation des aires de distribution de nombreuses maladies infectieuses et parasitaires, épidémies plus nombreuses et plus graves, apparition de maladies infectieuses émergentes, qu'en est-il exactement ? Je fais ici le point sur ce que l'on sait exactement des relations entre changements climatiques et maladies infectieuses ou parasitaires. Je discute des biais importants que ce thème a rencontrés au cours de sa courte existence, et recommande un rééquilibrage nécessaire du sujet en y adossant une compréhension plus empreinte de culture de santé publique.

## Météorologie, climat, variabilité climatique et changements climatiques

Tout un chacun utilise le mot « météo » de manière régulière sans, toutefois, en connaître le sens exact, donnant ainsi lieu à de possibles confusions. Le mot « météo » est une réduction du terme « météorologie » qui possède, au moins, deux sens : celui de la situation atmosphérique (température, précipitations, pression atmosphérique, nuages, vents) dans un certain lieu et à une certaine date ; celui de l'étude scientifique des phénomènes atmosphériques et de leur projection dans le temps et pour une région particulière. La météorologie est ainsi l'étude du temps à court terme et sur une zone limitée. En revanche, la climatologie s'intéresse aux phénomènes météorologiques sur de plus larges étendues et de plus longues durées. Toutefois, le climat correspond aussi à une représentation sociale et territoriale des états de l'atmosphère dans leur succession habituelle, et on parlera ainsi du climat breton et, plus précisément, de celui du golfe du Morbihan qui conditionne une floraison et fructification précoces, par rapport à d'autres régions européennes de même latitude, par exemple. La variabilité climatique correspond à la variation intra- et interannuelle du climat autour de ses valeurs moyennes, à des échelles temporelles de plusieurs décennies, et constitue ainsi une caractéristique inhérente du climat. La variabilité climatique échappe souvent à la mémoire individuelle, voire même collective, et c'est souvent ces irrégularités naturelles qui marquent les populations qui l'associent au changement climatique. Le

changement climatique, mais il est plus raisonnable d'en parler au pluriel, correspond aux changements de climat attribués directement ou indirectement aux activités humaines qui viennent altérer la composition de l'atmosphère terrestre, et se surajoutent donc à la variabilité du climat.

Un nombre conséquent de travaux scientifiques sur le thème changement(s) climatique(s) et maladies infectieuses confond allègrement ces quatre niveaux, et la plupart se focalisent sur des considérations météorologiques et climatiques uniquement. Les résultats, souvent issus d'études expérimentales au laboratoire ou in situ, sont alors extrapolés aux conditions futures de changement climatique comme une augmentation de température de 4 °C [1]. De même, plusieurs études étudient les liens entre des indicateurs climatiques et océanographiques de variabilité climatique régionale ou globale, comme le fameux phénomène ENSO, contraction de *El Niño* et *Southern Oscillation* (« Oscillation australe ») et l'origine et le développement d'épidémies de maladies infectieuses ou parasitaires, sans toutefois implicitement adresser le thème des changements climatiques [2]. Si les modèles tendent à suggérer que les changements climatiques pourront affecter la puissance des oscillations de ce type de phénomène régional, il n'en demeure pas moins que le sujet changement(s) climatique(s) et maladies infectieuses demeure, pour le moment, peu exploré, voire détourné de ses intentions originelles.

## Des travaux très orientés vers une démonstration d'effets positifs des changements climatiques

Guégan et Moatti [3] déterminent trois périodes dans la production scientifique sur le thème des changements climatiques et de leurs impacts sur la santé humaine. Ces séquences peuvent être décrites ainsi : 1) une première, qui correspond à un engouement de production scientifique, le plus souvent disciplinaire de mi-1980 à mi-1990 environ ; 2) une deuxième, allant jusqu'à mi-2000, qui est celle de la confrontation interdisciplinaire et des questionnements ; et 3) une troisième, étalée de 2005 à l'actuel, que l'on peut qualifier de repositionnement doctrinal. Ces auteurs discutent de la problématique ontologique du sujet, en y apportant un regard critique, dans une perspective résolument interdisciplinaire. La première séquence connaît une production scientifique abondante, mais aussi très orientée dans le sens où le changement climatique est utilisé comme quasi unique déterminant pour comprendre les états de santé. Dans une analyse systématique de la bibliographie, sur les effets des changements climatiques sur la transmission d'agents pathogènes humains à transmission vectorielle, Franklin et al. [4] confirment cette orientation en démontrant que 97 % des travaux scientifiques, révélant un effet significatif (soit 54 % des études pour 46 % montrant une tendance à la réduction ou aucun effet) du changement climatique sur les maladies infectieuses et parasitaires à transmission vectorielle,

ont utilisé la température comme variable d'ajustement à leurs modèles de projection. Autrement dit, avec l'augmentation de la température, les dynamiques de transmission de ce type d'agents pathogènes s'accroissent et leurs distributions géographiques s'amplifient sous l'effet d'une dispersion croissante des arthropodes qui les transmettent. La nature biologique de ces interactions complexes, par essence non linéaires, n'est ici plus respectée, et l'on s'étonne alors des commentaires critiques, voire des conséquences allant vers une réduction des aires géographiques et du poids morbide et mortel occasionnés par les changements climatiques [5]. Cette vision très simpliste de l'épidémiologie de ce type d'infections humaines a été très fortement critiquée, notamment, par Lafferty [6] et Guégan et Simard [7]. C'est cette même vision linéaire du changement climatique, vers ses impacts sanitaires, qui a fourni une abondante production scientifique dans les journaux scientifiques les plus prestigieux, laquelle est aujourd'hui profondément remise en cause. Des scientifiques, adeptes d'un rôle radical des changements climatiques sur la transmission d'agents infectieux, en particulier à transmission par des arthropodes vecteurs, ont littéralement fait leur *mea culpa* dans un numéro spécial du prestigieux journal *Philosophical Transactions of the Royal Society, London* (voir [8] et [9], et l'ensemble des articles très intéressants du volume). Pour bien connaître un grand nombre de ces auteurs, je reste intellectuellement frappé de voir le pouvoir d'affirmations et de certitudes dans une tentation autoritaire de certains, à cette époque, pour un sujet que je considère constituer l'un des plus complexes qui soit [10]. Avec la deuxième séquence, issue d'une phase d'arguments en faveur d'un rôle important des changements climatiques, s'installe une accumulation de contre-arguments concomitamment à un repositionnement structurel, visant à intégrer les changements climatiques comme un élément du changement global plus général. Une prise de conscience naît à cette période : que la planète constitue un écosystème global unique, et que les biens et services écosystémiques, offerts par la nature, forment les déterminants écologiques de la santé, non seulement humaine, mais aussi animale et des écosystèmes [11-13]. Cette même période met ainsi en avant l'importance des changements globaux (*Global environmental change*, ou GEC) dont les changements climatiques en constituent un des éléments, mais pas le seul ! La recherche sur le thème du changement climatique et de ses conséquences sanitaires s'interroge, alors, en réinterprétant les travaux antérieurs et, surtout, en considérant d'autres déterminants explicatifs aux conséquences sanitaires infectieuses. Choisissons deux exemples illustratifs à cet effet. Un premier exemple international révèle l'importance de la densité humaine comme déterminant explicatif principal du risque parasitaire à paludisme en Afrique [14], ce que tend à confirmer une étude plus récente [15], même si le climat et son évolution représentent, évidemment, des paramètres essentiels au cycle de vie des moustiques vecteurs et à la transmission parasitaire.

Cette interprétation est à comparer avec les résultats très orientés issus de la première période citée plus haut. Un second exemple, national celui-ci, concerne les rapports produits par l'Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique en 2007 où un numéro entier de 208 pages est dédié aux risques sanitaires [16], alors qu'une version ultérieure, en 2005, n'en consacre que quelques pages uniquement [17], et même si une péréquation est utile sur le nombre total de pages des deux volumes pour effectuer une comparaison équitable. La période actuelle tend à corriger finalement cette épistémologie naïve et opportuniste sans, comprenons-nous le bien, remettre en cause l'importance climatique dans la transmission infectieuse et ses conséquences multiples. Mon propos ici n'est donc pas de dévoyer l'importance climatique sur ces sujets sanitaires d'importance, mais bien de dénoncer une vision trop disciplinaire et instrumentale. Je reviendrai sur ce sujet dans le paragraphe suivant concernant ce que l'on appelle le bruit étonnant.

### Des confusions encore persistantes entre danger et risque infectieux

Le risque peut ne pas avoir la même signification pour tout le monde, et s'il est largement confondu par les profanes avec celle de danger, il l'est aujourd'hui tout autant par les scientifiques et les médecins eux-mêmes. Le sens du mot « danger » donné par de nombreux dictionnaires peut être très ambigu, et souvent il est interprété comme synonyme de celui de « risque ». Un danger est constitué par toute source potentielle de dommage, de préjudice ou d'effet nocif à l'égard d'une chose, de l'environnement ou d'une personne [18]. De surcroît, le préjudice peut être considéré à tort comme être le danger, et l'on confond ainsi aisément comme actuellement la maladie à COVID-19 constituer le danger (alors qu'il s'agit d'un préjudice) lorsque le virus SRAS-CoV-2 représente l'agent biologique dangereux.

La notion de risque possède au moins deux acceptions courantes : la probabilité d'une issue, pour nous sanitaire, défavorable, ou un facteur, dit facteur de risque, qui augmente cette probabilité. Ainsi, le risque d'être atteint par la dengue en France métropolitaine peut être exprimé comme : 1) être plus élevé pour les populations vivant à proximité d'un aéroport international ; ou 2) être dépendant de facteurs de risque tels que la présence de moustiques-tigres contaminés et de pièces d'eau appropriées à la reproduction de celui-ci. Un facteur de risque est tout attribut, caractéristique ou exposition d'un individu, et qui augmente la probabilité de développer une maladie ou de souffrir d'un traumatisme.

En général, le risque infectieux se calcule comme le produit du ou de dangers présents ou attendus, d'expositions individuelles ou communautaires et de vulnérabilités individuelles ou communautaires. En santé au travail, ce sont, par exemple, des groupes d'individus, exerçant un même métier, qui seront exposés au même danger ; de surcroît, ces individus pourront



être rendus plus vulnérables par un manque d'information ou de formation. Ici, exposition et vulnérabilité sont souvent difficiles à dissocier, et le risque se résumera à la compréhension des expositions communautaires à un ou des dangers. La notion de risque, enfin, est étroitement associée à celle d'enjeu(x) : un risque infectieux peut être omis par un pouvoir politique, comme au Brésil par le Président Jair Bolsonaro, ou, au contraire, sublimé par certaines professions comme actuellement commenté en France.

Le présent paragraphe donne une explication très succincte de l'approche des risques sur les maladies infectieuses et parasitaires (voir [18] pour aller plus loin). Les efforts scientifiques considérables, ainsi qu'une majeure partie des ressources sanitaires actuelles, sont orientés sur le traitement des maladies, plutôt que sur leur prévention, plus particulièrement en France. Ces orientations ont été, d'un point de vue épistémologique, préjudiciables en entraînant une compréhension superficielle de phénomènes complexes : le moustique-tigre entraîne la maladie à virus du Zika qui, elle-même, provoque des traumatismes irréversibles de microcéphalie chez les nourrissons ou, encore, par l'essor de l'infectiologie exploratoire, la découverte de nouvelles entités virales ou bactériennes préjugées être pathogènes pour l'humain.

Cœur de la santé publique et de l'épidémiologie, l'étude des risques est la clé pour comprendre les conséquences sanitaires de nouvelles infections virales ou bactériennes. Étant donné que, souvent, les risques émergents ou ré-émergents ne surviennent pas isolément, il importe d'en déterminer les causes directes et indirectes des événements sanitaires qui se produisent. Les enjeux actuels, en matière de démographie humaine et de développement de ressources pour alimenter la population mondiale, doivent marquer un tournant civilisationnel si nous voulons abaisser les risques infectieux émergents et de futures pandémies [19].

## Une surévaluation probable des aires de distribution projetées

Que penserions-nous d'une agence immobilière à laquelle on s'adresse pour un achat de bien, et qui tend à survendre et surestimer son portefeuille de ventes ? Ainsi qu'expliqué dans le paragraphe précédent, les confusions énormes, entre danger et risque, ces 20 à 30 dernières années, ont conduit à une surestimation très probable ou vérifiée des aires de distribution d'agents infectieux, de leurs vecteurs ou de leurs hôtes réservoirs projetés dans un cadre de changements climatiques. Lafferty [6] s'est véritablement insurgé à ce sujet en argumentant sur le fait que les états fédéraux du sud des États-Unis ont connu, au cours du XX<sup>e</sup> siècle, une très nette diminution de cas de paludisme due à l'effort de santé publique, alors que ces régions ont connu, dans le même temps, une élévation de leur température moyenne. Même si une enveloppe de distribution géographique d'un agent infectieux peut croître plus au nord pour

l'hémisphère nord et plus au sud pour l'hémisphère opposé, dans un contexte de changements climatiques, il est aussi très possible qu'à l'intérieur de cette enveloppe des régions puissent connaître une régression du nombre de cas. De plus, les études écologiques et évolutives, sur les systèmes hôtes-pathogènes, tendent à nous montrer que, dans les franges d'aire de distribution géographique, ces mêmes interactions sont de nature différente et peuvent montrer des caractéristiques singulières freinant ou interdisant la transmission de l'agent pathogène. C'est ce que l'on remarque pour l'installation des populations du moustique-tigre dans les zones plus septentrionales en France qui montrent des difficultés à y installer des populations pérennes [20]. Des facteurs propres aux interactions hôtes-pathogènes dans les zones de front de progression tendent, en parallèle, à une moindre capacité de transmission par les populations d'insectes, voire à interdire celle-ci [21]. Les modèles actuels de projection climatique des aires de distribution futures d'agents infectieux ne prennent pas ou peu en compte ces éléments biologiques d'une complexité naturelle inhérente à ces systèmes. C'est ainsi plus des aires de distribution à l'image du vrai gruyère suisse sans trous qui sont scénarisées, et non pas des aires de distribution de l'emmental qui lui est pourvu de larges trous. La somme des « trous », et donc des absences de circulation infectieuse par zones, n'est pas estimée, alors qu'elle peut, en réalité, influencer une tendance majeure dans l'évolution de la distribution générale d'un agent infectieux que l'on veut modéliser [5].

## L'effet du bruit dit eltonien

Charles Sutherland Elton (1900–1991) était un écologue et zoologiste anglais brillant qui est resté connu pour sa définition de la niche écologique, dite fonctionnelle, et qui portera son nom. En revanche, on connaît beaucoup moins, jusqu'à dans la communauté des sciences écologiques, un second concept du à Elton, celui de l'hypothèse du bruit eltonien (en anglais *Elton sound's* ou *noise's hypothesis*). Dans ses travaux sur les espèces d'animaux et de plantes invasives, synthétisés dans un ouvrage pionnier, en 1958, *The Ecology of Invasions by Animals and Plants*, Elton avait identifié que les facteurs biotiques, comme ceux associés aux interactions entre espèces, y compris donc les activités humaines comme extension possible à ce concept, prenaient leur importance à des échelles locales lui permettant de définir les principes de la niche dite eltonienne. En revanche, au fur et à mesure que l'on s'éloignait des échelles locales, des facteurs abiotiques, comme ceux liés à la météorologie et au climat, venaient mieux rendre compte de la présence et de la distribution géographique des espèces (éléments prépondérants dans l'explication de la niche dite de Grinnell). Ainsi, en fonction du niveau d'échelle spatiale auquel était menée une étude, des déterminants explicatifs différents apparaissaient vrais mais, avec l'augmentation des échelles, la part explicative due aux facteurs biotiques était absorbée par les facteurs

abiotiques – le fameux bruit d'Elton. Chavy et ses collaborateurs ont travaillé sur la présence et la distribution géographique des foyers de leishmanioses cutanées humaines en l'interprétant à deux niveaux d'échelles, celui du continent sud-américain et celui de la Guyane française [22]. À l'échelle du continent, ce sont prioritairement des facteurs climatiques qui conditionnent la répartition de foyers épidémiques à la fois parce que ce sont souvent les seules variables disponibles et que les variables biotiques sont souvent absentes, incomplètes ou non considérées par les travaux. À l'échelle du territoire guyanais, ce sont les activités humaines en interaction avec les habitats naturels et leur biodiversité, et en particulier la transformation des habitats comme la déforestation, qui engendrent des « poches » favorables au déclenchement de foyers de leishmaniose et à leur diffusion. En partant de l'existence de ce bruit, ces auteurs ont alors modélisé la distribution de la répartition des foyers de leishmaniose à l'échelle continentale en prenant en considération, autant que faire se peut, des paramètres biotiques en les confrontant aux facteurs abiotiques. Le résultat est édifiant : ce sont alors ces paramètres biotiques et, plus particulièrement, l'empreinte humaine sur les écosystèmes naturels néotropicaux qui rendent compte de la distribution géographique des cas de leishmanioses en Amérique du Sud, et non pas le climat et ses tendances futures. La modélisation de la « surface du gruyère » homogène à l'aide de paramètres climatiques ne préjuge ainsi en rien de l'existence possible d'un emmental perforé et entamé sur ses bordures, que les modèles et les paramètres utilisés habituellement sur le thème changements climatiques-santé n'appréhendent pas ou peu. Les erreurs commises reposent, pour partie, sur l'absence de prise en considération du bruit eltonien dans les travaux [22] ; une notion qui s'inscrit plus généralement dans les concepts de changement d'échelles et de systèmes complexes [23].

## Conclusion

J'ai décrit, dans cet article, le contexte dans lequel les travaux sur changements climatiques – maladies infectieuses et parasitaires

se sont construits, et les manquements dont ils souffrent encore aujourd'hui. La santé publique est issue de la lutte contre les conditions environnementales et sociales causées par l'urbanisation et l'industrialisation à l'origine des maladies. À cette époque, on s'intéressait à l'hygiène, au traitement de l'eau, à l'amélioration des conditions de vie, puis progressivement à l'immunisation, à l'hygiène domestique et à l'amélioration de la nutrition. Aujourd'hui, les grands changements écologiques planétaires, les forces sociales et économiques, qui en sont à l'origine, et leurs retombées sanitaires bouleversent le champ actuel de la santé publique internationale [24]. Les changements climatiques sont une composante importante du changement global, et ont des conséquences directes et indirectes sur la santé des populations. Si la vision sur le thème a été très climatocentrée, il est nécessaire que la santé publique moderne intègre la santé humaine comme étroitement dépendante de l'efficacité des écosystèmes, de la santé des autres espèces et de la soutenabilité de nos actions humaines. Avec ce début de XXI<sup>e</sup> siècle, une nouvelle santé publique, moins mimétique de préceptes anciens et plus en phase avec la mondialisation et ses conséquences, est en train d'apparaître, intégrant la biosphère et les éléments du déclin des fonctions écologiques planétaires. L'émergence de nouveaux risques sanitaires a poussé la santé publique à développer ses activités environnementales, mais l'histoire récente du sujet climat – maladies infectieuses et parasitaires reste aussi exemplaire des contraintes de ce changement, comme de la complexité intrinsèque, parfois conflictuelle, des liens environnement – santé. L'identité et la cohérence du thème changements climatiques et santé se structureront mieux autour d'une vision partagée et intégrée des conséquences sanitaires et de leurs déterminants plurifactoriels.

**Financement** : JFG est actuellement financé pour ses travaux de recherche par un programme US NSF-NIH Ecology and evolution of infectious diseases (NSF#1911457).

**Déclaration de liens d'intérêts** : l'auteur déclare ne pas avoir de liens d'intérêts.

## Références

- [1] Plantard O, Huber L, Guégan J-F. Moving towards a new discipline – health ecology. In: Adaptation to climate change. Special volume. Paris: Pour la Science/INRA; 2015p. 30–5.
- [2] Wu X, Yongmei L, Zhou S, Chen L, Xu B. Impact of climate change on human infectious diseases: empirical evidence and human adaptation. Environ Int 2016;86: 14–23.
- [3] Guégan J-F, Moatti J-P. Climate change and the issues for health in the South. In: Reinert M, Janicot S, Aubertin C, Bernoux M, Dounias E, Guégan J-F, Lebel T, Mazurek H, Sultan B, editors. Climate change: what challenges for the South?. Marseille, France: IRD Editions; 2015. p. 191–203.
- [4] Franklins LHV, Jones KE, Redding DW, Abubakar I. The effect of global change on mosquito-borne disease. Lancet Infect Dis 2019;19:e302–12.
- [5] Guégan J-F. 2050, Bamako, Mali, une saison caniculaire. Actual Dossier Sante Publique 2015;93:40–2.
- [6] Lafferty KD. The ecology of climate change and infectious diseases. Ecology 2009;90: 888–900. doi: [10.1890/08-0079.1](https://doi.org/10.1890/08-0079.1).
- [7] Guégan J-F, Simard F. Changements environnementaux et maladies infectieuses : mieux coordonner la surveillance. Actual Dossier Sante Publique 2015;93:22–8.
- [8] Parham PE, Waldo J, Christophides GK, Michael E. Climate change and vector-borne diseases of humans. Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci 2015;370:20140377. doi: [10.1098/rstb.2014.0377](https://doi.org/10.1098/rstb.2014.0377).

- [9] Parham PE, Waldo J, Christophides GK, Hemming D, Agosto F, Evans KJ, et al. Climate, environmental and socio-economic change: weighing up the balance in vector-borne disease transmission. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci* 2015;370:20130551. [doi: 10.1098/rstb.2013.0551](https://doi.org/10.1098/rstb.2013.0551).
- [10] Guégan J-F. Changement climatique et santé : des liens complexes. *Pour la Science* 2015;89:56-8.
- [11] Rockström J, Steffen W, Noone K, Persson Å, Chapin III FS, Lambin E, et al. Planetary boundaries: exploring the safe operating space for humanity. *Ecol Soc* 2009;14:32.
- [12] Steffen W, Richardson K, Rockström J, Cornell SE, Fetzer I, Bennett EM, et al. Planetary boundaries: guiding human development on a changing planet. *Science* 2015;347:736 [1259855].
- [13] Whitmee S, Haines A, Beyrer C, Boltz F, Capon AG, Ferreira de Souza Dias B, et al. Safeguarding human health in the Anthropocene Epoch: report of The Rockefeller Foundation – LANCET commission on planetary health. *Lancet* 2015;386:1973–2028.
- [14] Moffett A, Shackelford N, Sarkar S. Malaria in Africa: vector species' niche models and relative risk maps. *PLoS ONE* 2007;2:e824. [doi: 10.1371/journal.pone.0000824](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0000824).
- [15] Caldwell JM, LaBeaud AD, Lambin EF, Stewart-Ibarra AM, Ndenga BA, Mutuku FM, et al. Climate predicts geographical and temporal variation in mosquito-borne disease dynamics on two continents. *Nat Commun* 2021;12:1233. [doi: 10.1038/s41467-021-21496](https://doi.org/10.1038/s41467-021-21496).
- [16] Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique. Changements climatiques et risques sanitaires en France, septembre 2007. Paris, France: ONERC; 2007208 [[https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/ONERC\\_Rapport\\_2007\\_RisquesSanitaires\\_WEB.pdf](https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/ONERC_Rapport_2007_RisquesSanitaires_WEB.pdf)].
- [17] Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique. L'adaptation de la France au changement climatique. In: 2012. Paris, France: La documentation française; 201280 [[https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/ONERC\\_Rapport\\_2011\\_AdaptationFrance.pdf](https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/ONERC_Rapport_2011_AdaptationFrance.pdf)].
- [18] Organisation mondiale de la santé. Définition et évaluation des risques pour la santé. Chapitre 2. In: The world health report 2002 – reducing risks promoting healthy life. Genève, Suisse: Organisation mondiale de la santé; 2012p. 9–30 [<https://www.who.int/whr/2002/en/chapter2fr.pdf>].
- [19] Guégan J-F, Ayoub A, Cappelle J, Thoisy B. Emerging infectious diseases and tropical forests: unleashing the beast within. *Environ Res Lett* 2020;15:083007, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ab8dd7/pdf>.
- [20] Roche B, Léger L, L'Ambert G, Lacour G, Foussadier R, Besnard G, et al. The spread of *Aedes albopictus* in Metropolitan France: contribution of environmental drivers and human activities and predictions for a near future. *PLoS ONE* 2015;10:e0125600. [doi: 10.1371/journal.pone.0125600](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0125600).
- [21] Schaffner F, Mathis A. Dengue and dengue vectors in the WHO European region: past, present, and scenarios for the future. *Lancet Infect Dis* 2014;14:1271–80. [doi: 10.1016/S1473-3099\(14\)70834-5](https://doi.org/10.1016/S1473-3099(14)70834-5).
- [22] Chavy A, Ferreira Dales Nava A, Luiz Bessa Luz S, Ramirez JD, Herrera G, Vasconcelos dos Santos T, et al. Ecological niche modelling for predicting the risk of cutaneous leishmaniasis in the Neotropical moist forest biome. *PLoS Neglected Trop Dis* 2019;13:e0007629.
- [23] Ezenwa VO, Prieur-Richard A-H, Roche B, Bailly X, Becquart P, García-Peña GE, et al. Interdisciplinarity and infectious diseases: an Ebola case study. *PLoS Pathog* 2015;11:e1004992. [doi: 10.1371/journal.ppat.1004992](https://doi.org/10.1371/journal.ppat.1004992).
- [24] ACSP. Les changements globaux et la santé publique : qu'en est-il des déterminants écologiques de la santé ?. Ottawa, Canada: Document de travail de l'Association canadienne de santé publique; 201532 [[https://www.cpha.ca/sites/default/files/assets/policy/edh-discussion\\_f.pdf](https://www.cpha.ca/sites/default/files/assets/policy/edh-discussion_f.pdf)].

