

► La dengue est une infection virale dont l'agent causal, le virus de la dengue (DENV), est transmis par les moustiques du genre *Aedes*. Au cours des dernières décennies, la dengue est devenue une préoccupation majeure en raison de sa propagation rapide et de son impact significatif sur la santé publique. Le changement climatique est reconnu comme un facteur majeur de l'expansion géographique de la dengue et de ses vecteurs. Le changement climatique influence la transmission de la dengue *via* des changements de température et de pluviosité affectant les moustiques vecteurs et l'arbovirus. Le changement climatique peut également perturber les migrations humaines, qui facilitent alors la dispersion du virus, et favoriser l'expansion de moustiques vecteurs vers de nouvelles régions. Il est essentiel de comprendre l'impact du changement climatique sur la dengue et ses vecteurs pour élaborer des stratégies efficaces de prévention et de contrôle de la maladie. Des stratégies adaptées de lutte contre les moustiques, une surveillance épidémiologique renforcée et un système de santé publique plus adaptée sont nécessaires pour atténuer le fardeau croissant de la dengue dans un contexte de changement climatique. ◀

Changement climatique, virus de la dengue et ses vecteurs

La dengue est devenue un lourd fardeau pour la santé publique à l'échelle mondiale [1]. Cette maladie virale transmise par les moustiques du genre *Aedes* est due à un *Orthoflavivirus* de la famille des *Flaviviridae*, le virus de la dengue (DENV) pour lequel quatre sérotypes sont décrits (DENV-1 à 4). Le génome du DENV est constitué d'environ 11 000 bases. Comme la majorité des arbovi-

Les effets du changement climatique sur l'émergence de la dengue

Benjamin Dupuis, Lazare Brézillon-Dubus, Anna-Bella Failloux



Institut Pasteur,
université Paris Cité,
Arboviruses and Insect Vectors,
Paris, France.
afailou@pasteur.fr

rus, l'infection par le virus de la dengue est asymptomatique dans 50 à 90 % des cas. Dans certains cas, des symptômes (fortes fièvres, des douleurs musculaires et articulaires, des vomissements et des éruptions cutanées) peuvent se déclarer entre 4 et 10 jours après l'infection par la piqûre du moustique. Cette forme bénigne de la dengue disparaît entre 2 et 7 jours après le début des symptômes. Une forme de dengue, appelée « dengue sévère » ou « dengue hémorragique », touche cependant 1 à 5 % des cas symptomatiques [2]. Cette forme sévère de la maladie atteint les personnes qui ont déjà été infectées par un sérotype de dengue, et sont de nouveau infectées par un virus d'un sérotype différent. Ce phénomène, appelé facilitation de l'infection par des anticorps, plus connu sous l'acronyme anglais d'ADE pour *antibody-dependant enhancement* [3], se produit lorsque des anticorps non neutralisants, produits lors d'une première infection par un DENV, se fixent à des récepteurs des fragments Fc des immunoglobulines G (FcγR) portés par des cellules immunitaires, telles que des macrophages, facilitant l'entrée et la réplication du nouveau virus. Ce mécanisme peut représenter un obstacle au développement d'un vaccin à l'origine de la production d'anticorps qui, *via* l'ADE, aggraveront les symptômes de la maladie.

L'Organisation mondiale de la santé (OMS) distingue quatre stades de la maladie allant de la dengue classique (stade 1) à la dengue hémorragique (stade 4), cette dernière pouvant aboutir à un syndrome de choc et au décès du patient [4]. Chaque année, la dengue affecte 390 millions de personnes, dans plus de 100 pays [5], essentiellement dans les régions tropicales et subtropicales [6]. Actuellement, il n'existe pas de traitements spécifiques contre la dengue et seul deux

Vignette (© BioRender).

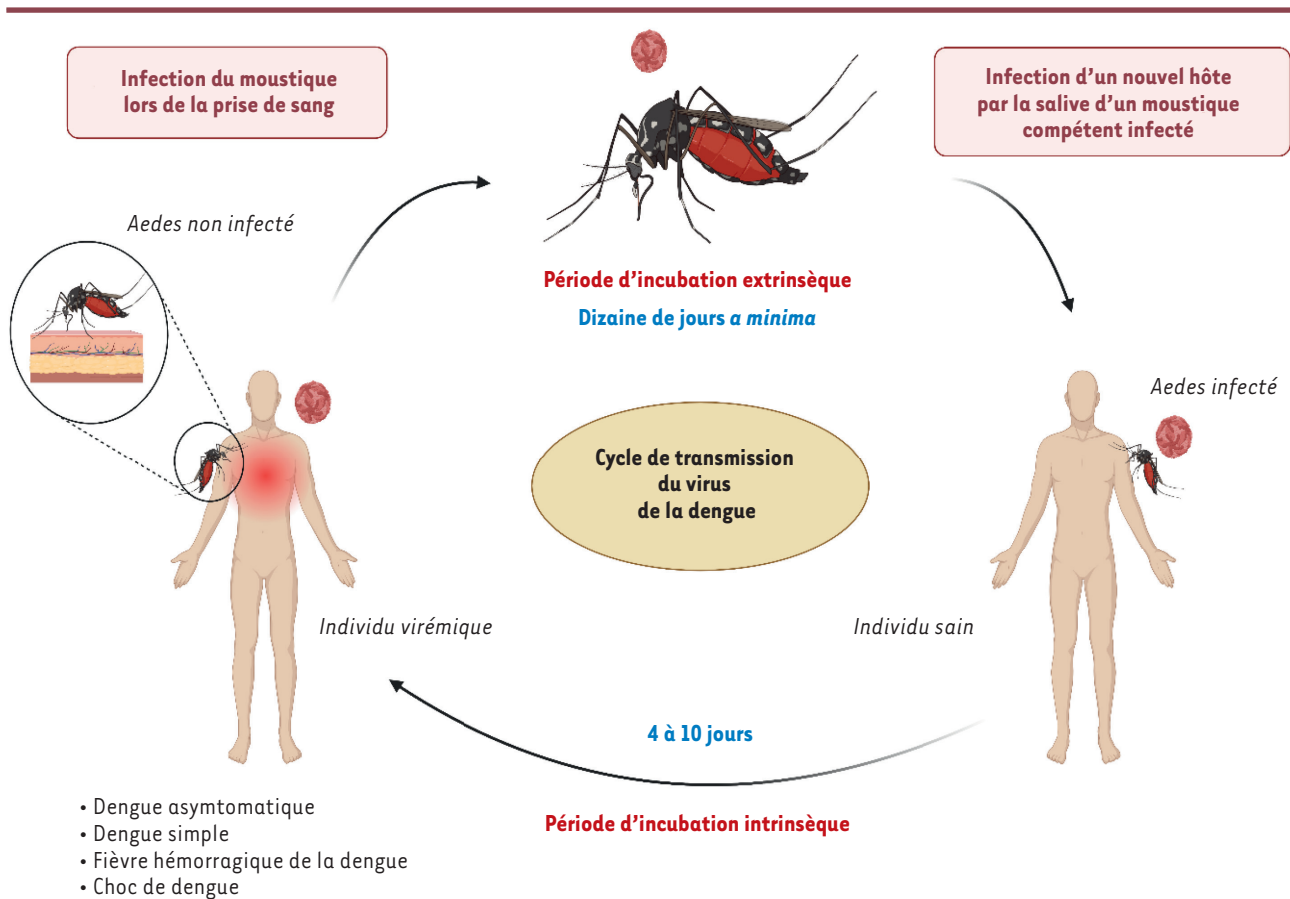


Figure 1. Cycle urbain de transmission du DENV par les moustiques du genre *Aedes*. 1. La période d'incubation extrinsèque correspond à la durée entre le moment où un moustique compétent (capable de transmettre l'arbovirus) réalise un repas sanguin infectieux (sang de sujet infecté) et le moment où il va être capable de transmettre le virus (virus présent dans la salive du moustique). 2. La période d'incubation intrinsèque correspond au délai entre le moment de l'infection *via* la piqûre du moustique infecté et l'apparition des premiers symptômes chez l'homme (créée avec BioRender).

vaccins à l'efficacité incomplète ont été préqualifiés par l'OMS : Dengvaxia® (*Sanofi*) et Qdenga® (*Takeda*) [7,8].

Les principaux moustiques vecteurs du virus de la dengue, *Aedes aegypti* et *Aedes albopictus* (ou moustique-tigre), prospèrent dans des environnements urbains et périurbains, à fortes densités humaines [9]. Ces moustiques pondent dans de petits gîtes artificiels remplis d'eau, tels que les récipients, les pneus usagés, les pots de fleurs ou encore les réservoirs d'eau [10]. Au stade adulte, les femelles piquent les individus afin de récupérer le sang nécessaire à la production de leurs œufs. C'est à ce stade que les arbovirus, dont DENV, sont transmis à l'hôte vertébré *via* la salive du moustique lors de la piqûre (Figure 1) [10].

L'augmentation des températures est le principal paramètre du changement climatique. Selon le groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), le plus optimiste des scénarios envisagés pour l'avenir aboutirait, d'ici 2030-2052, à une augmentation de la température mondiale de 1,5 °C [11]. La dynamique des précipitations annuelles serait également modifiée avec une augmentation des pluies à l'équateur et dans les hautes latitudes, et une réduction dans les zones

tropicales et subtropicales, ce qui affecterait l'humidité relative [11]. Les zones géographiques déjà affectées par la dengue s'étendraient donc, augmentant la proportion de la population humaine à risque d'infection [12]. Les variations climatiques influent sur la distribution géographique des vecteurs [9,13], modifient les schémas de migration et de déplacement des populations humaines [14], et affectent les conditions environnementales qui favorisent la propagation du virus [13,15]. La compréhension de l'impact du changement climatique sur la dengue et ses vecteurs devrait permettre de mieux anticiper les potentiels scénarios futurs. Afin de mieux comprendre les modifications provoquées par les changements climatiques, nous utiliserons dans cette revue la notion de capacité vectorielle qui décrit la capacité d'une population de vecteurs à transmettre un agent pathogène à un hôte dans un environnement déterminé et à un moment donné [16] (Figure 2).

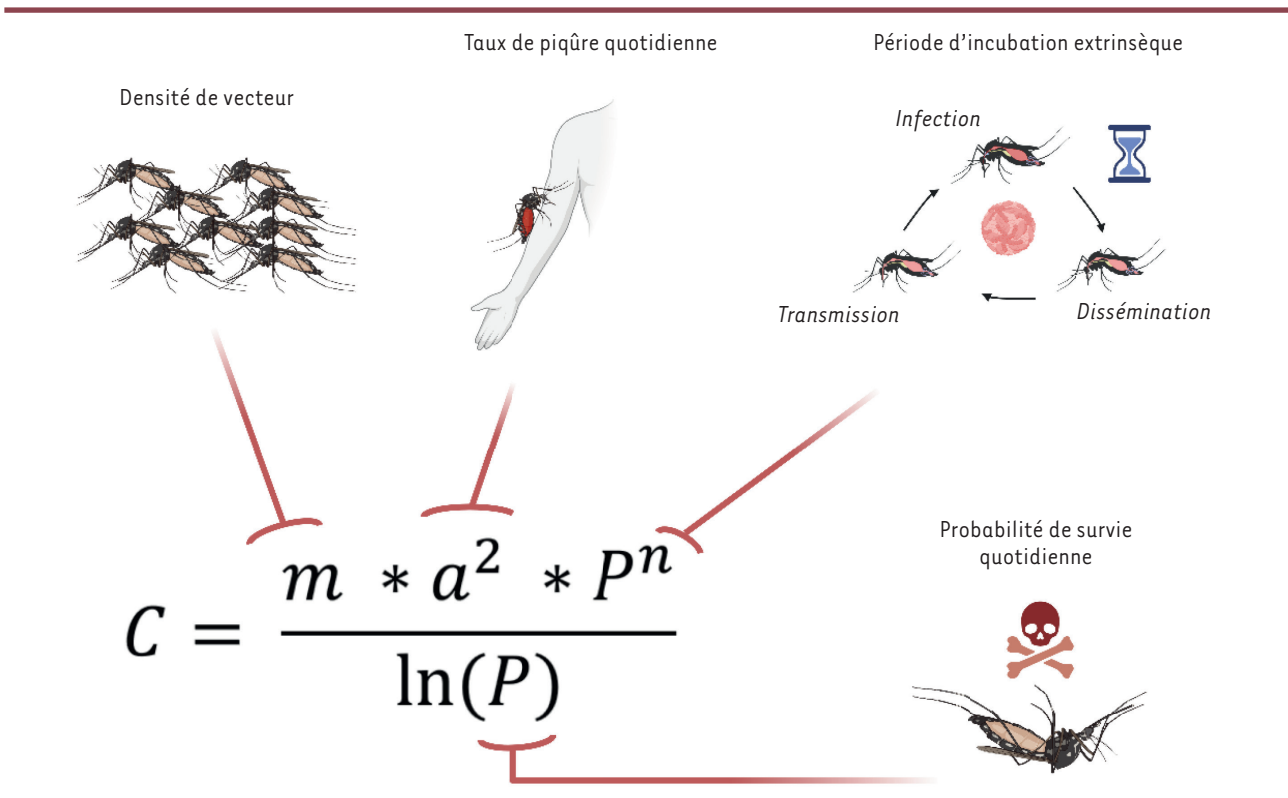


Figure 2. Formule de la capacité vectorielle d'une population de vecteur pour un agent pathogène donné. C : capacité vectorielle ; m : densité de moustiques par homme ; a : nombre moyen de piqûres par homme et par jour ; Ln(P) : logarithme népérien de la probabilité de survie quotidienne du vecteur ; n : durée de la période d'incubation d'extrinsèque (créée avec BioRender).

Impact du changement climatique sur les dynamiques de transmission du DENV et de ses vecteurs

Les paramètres que nous examinerons plus précisément seront la température, les précipitations/humidité, ainsi que l'impact des événements météorologiques (comme El Niño¹) et des catastrophes naturelles résultant du changement climatique.

Influence de la température

L'augmentation de la température s'accompagne d'une modification de l'aire de répartition des principaux vecteurs du DENV, *Ae. aegypti* et *Ae. albopictus* [9]. En effet, les modifications du climat permettent l'installation d'espèces de moustique, comme *Ae. albopictus*, dans des latitudes plus élevées [9]. Originnaire d'Asie du sud-est, ce moustique a été détecté pour la première fois en Europe, en Albanie en 1979 [17], puis en Italie en 1990 [18], l'espèce ayant été importée respectivement de Chine et des États-Unis dans des pneus usagés. En France métropolitaine, *Ae. albopictus*, qui a été introduit en 2004 en provenance d'Italie, est aujourd'hui présent dans 78 des 96 départements [19]. D'autres espèces invasives vectrices du DENV, *Aedes japonicus* ou

Aedes koreicus, ont également été introduites en Europe [20,21]. L'élévation de la température à des niveaux comparables à ceux décrits dans les modélisations du GIEC, permet l'augmentation de l'aire de distribution de ces espèces de moustique et accroît le risque de contacts entre vecteurs infectés et hôtes [22].

Les moustiques étant des organismes exothermes, l'augmentation des températures à des valeurs compatibles avec leur survie influence leur métabolisme et donc leur développement [23], avec une réduction du temps nécessaire entre l'éclosion des œufs et l'émergence des adultes [24-26]. Au niveau cellulaire, les mécanismes impliqués ne sont pas tous élucidés. Ils reposent cependant sur la loi d'Arrhenius [27] selon laquelle les réactions chimiques sont plus rapides à des températures plus élevées parce que les molécules possèdent plus d'énergie pour surmonter la barrière d'activation. La température influence également le comportement de piqûre du moustique : la fréquence des repas sanguins s'accroît [28], avec une accélération de la prise de sang [29], et la ponte des œufs est stimulée, le tout conduisant à une augmentation de la densité de population moustiques [23,30,31]. Pour une popu-

¹ Le phénomène El Niño, phénomène océanique, se caractérise par le réchauffement d'un immense réservoir d'eau superficielle qui s'étend du Pacifique central jusqu'aux côtes du Pérou et de l'Équateur.

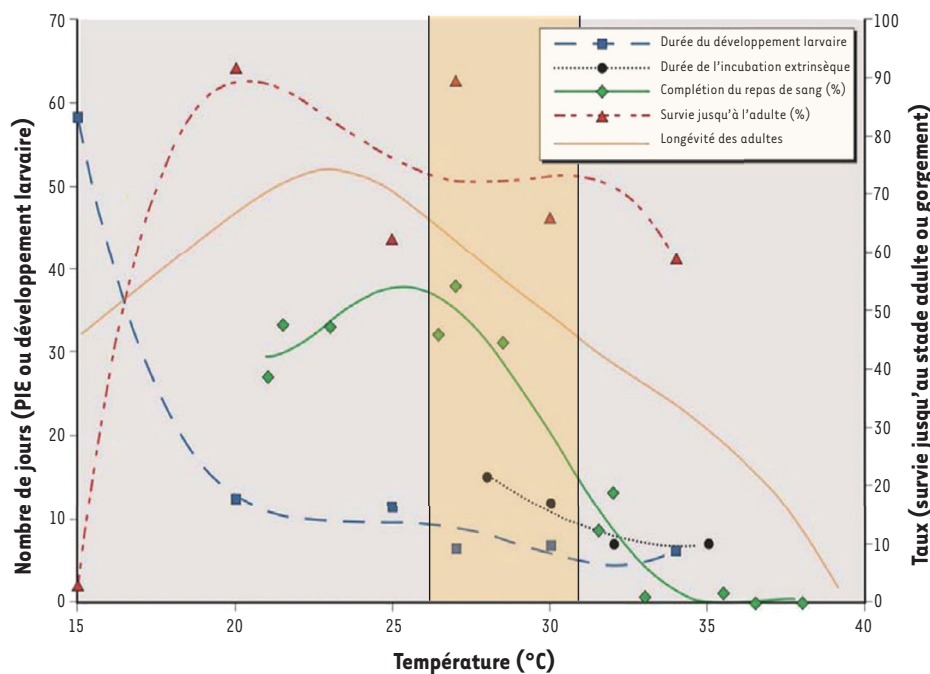


Figure 3. Effets de la température sur plusieurs variables associées à la transmission du DENV par le moustique *Aedes aegypti*. Courbe bleue : nombre de jours nécessaires au développement larvaire. Courbe noire : durée de la période d'incubation extrinsèque du DENV-2. Courbe verte : pourcentage d'*Ae. aegypti* ayant terminé leur repas sur une source de sang à 37 °C après 30 min. Courbe rouge : pourcentage de larves d'*Ae. aegypti* ayant survécu jusqu'à l'âge adulte après éclosion. Courbe orange : longévité des moustiques adultes. L'aire en jaune représente l'intervalle de températures optimales pour la survie du moustique, tout en maintenant fonctionnel le système vectoriel (adapté de [44]).

lation de vecteur, l'augmentation des températures favoriserait ainsi la densité (m) et le taux de piqûre (a) [32,33]. Dans des zones où les températures sont extrêmes, une trop forte température (supérieure à 35 °C) peut cependant avoir un effet inverse sur certains moustiques et diminuer leur capacité vectorielle en affectant leur survie et par conséquent, la densité de moustiques vecteurs (Figure 3) [34].

L'augmentation de la température affecte également le cycle du DENV qui dépend du métabolisme cellulaire de son hôte, en réduisant la période d'incubation extrinsèque, (noté n dans la formule de la capacité vectorielle), correspondant à la durée entre le moment où un virus est ingéré par un vecteur lors du repas sanguin et celui où il devient capable de transmettre le virus (Figure 3) [31]. Une courte période d'incubation extrinsèque augmente le potentiel de transmission du DENV [35]. En effet, si la durée nécessaire au virus pour être transmis diminue, le moustique pourra transmettre plus rapidement le virus à l'être humain. Notons que des températures plus importantes (proches de celles des modélisations du GIEC) réduisent la période d'incubation extrinsèque pour de nombreux arbovirus comme le virus Zika [36], le virus chikungunya [37] ou encore le DENV [38,39].

L'augmentation de la température peut également avoir un effet sur le virus lui-même, en modifiant la structure de sa protéine d'enveloppe [40]. En effet, il a été montré qu'en fonction de la température, la surface du virus de sérotype 2 (DENV-2) change de structure, passant, en microscopie (CryoEM), d'une surface lisse (forme « smooth ») à une surface bosselée (forme « bumpy ») lorsque la température est proche de 37 °C [41,42]. L'augmentation globale des températures pourra conduire ainsi à des modifications structurales et génétiques du DENV et d'autres arbovirus. Ces modifications pourraient être à l'origine de l'évolution, de la sélection et de la transmission des arbo-

virus, modifiant potentiellement les dynamiques du DENV [43].

Influence des précipitations, de la sécheresse et de l'humidité

Comme la température, les précipitations sont un paramètre essentiel pour la modélisation et la compréhension de la transmission du virus de la dengue [45]. En effet, une augmentation annuelle de 50 mm des précipitations et de 1 % d'humidité, accroît le risque d'épidémie de dengue de 1 % [46]. Ceci peut s'expliquer (selon les modèles de prédiction [9,11]) par l'augmentation des précipitations qui favorise la création de gîtes de pontes et stimule l'éclosion des œufs, participant ainsi à l'augmentation des densités de populations de vecteurs, et donc des dynamiques épidémiques [23,47].

Une forte humidité relative favorise la survie des moustiques, augmentant la capacité vectorielle des populations. L'humidité relative est un paramètre climatique important dans la survie du moustique. En effet, son augmentation va accentuer l'activité du moustique et donc le taux de piqûres (a), augmentant la capacité vectorielle [48].

A contrario, la sécheresse n'est pas propice au développement des moustiques et réduit la capacité vectorielle. Toutefois, les sécheresses peuvent paradoxalement augmenter la densité de moustiques [23] : les périodes de sécheresse précédées de pluie augmentent

la densité de populations de moustiques, en raison de l'augmentation du stockage de l'eau dans les réservoirs, créant des gîtes pour les moustiques du genre *Aedes* [49] influant sur la densité de populations de vecteurs (m).

Influence des catastrophes et des phénomènes climatiques

Les changements climatiques exacerbent les catastrophes climatiques. En effet, depuis 1950, la fréquence, l'intensité, l'étendue géographique et la durée de ces événements se sont modifiées et les projections montrent que ces changements seront poursuivis avec le changement climatique [50]. L'augmentation des températures provoque, par évaporation de l'eau, une plus grande quantité de vapeur d'eau dans l'atmosphère [51]. Ce phénomène alimente les tempêtes et modifie le régime des précipitations mondiales, les rendant plus intenses par endroits, et provoquant d'importantes inondations [51]. En parallèle, l'augmentation des températures est à l'origine de sécheresses plus nombreuses et plus fréquentes [52].

L'ensemble des phénomènes que nous avons présentés influence la biologie des moustiques vecteurs du DENV. En effet, il est possible d'imaginer que durant des phénomènes climatiques très intenses (inondations, tempêtes), la densité de population de vecteurs (m) diminue du fait du lessivage des gîtes, de la destruction de l'habitat ou des fortes rafales de vent [53]. Ces phénomènes intenses ne sont donc pas propices à la survie de l'insecte. Toutefois, après ces épisodes, la multiplication de nouveaux gîtes larvaires (cavités, habitations endommagées, stockage d'eau, eau stagnante) pourrait augmenter la densité des vecteurs [54-56].

Les changements climatiques peuvent jouer un rôle dans l'intensification de phénomènes comme El Niño - *southern oscillation* (ENSO). Ce phénomène apparaît lorsque les températures anormalement élevées dans la partie est de l'océan Pacifique Sud, conduisent à des modifications de la circulation atmosphérique globale [57]. Les températures plus élevées vont alors contribuer à augmenter les densités de population de moustiques [58]. En Colombie, le nombre de cas de dengue est significativement plus élevé durant le phénomène El Niño, en comparaison avec les périodes de neutralité climatique, ou durant les périodes de La Niña² au cours desquelles les perturbations climatiques dans la région Pacifique sont moins nombreuses. Une plus forte pluviométrie va faciliter la création de gîtes larvaires et contribuer à augmenter les densités de moustiques [23,59].

Facteurs humains

L'augmentation en fréquence des phénomènes climatiques est, et sera, certainement à l'origine de nombreux mouvements de populations [14,60], principalement de pays tropicaux ou subtropicaux endémiques pour la dengue vers des régions où la maladie n'est pas encore présente. Ces déplacements peuvent être à l'origine de l'introduction du DENV par des cas importés [61] mais également

être propices à l'introduction d'espèces de moustiques vecteurs [62]. Suite au changement climatique qui peut avoir des conséquences sur les migrations et les mobilités humaines, une plus forte circulation de la dengue et d'autres arbovirus peut être attendue au niveau mondial.

Les solutions à envisager

Le risque de dengue étant accru par les changements climatiques (Figure 4), il est nécessaire de l'anticiper afin d'éviter les épidémies au niveau mondial. La surveillance épidémiologique nécessite d'être renforcée afin de détecter rapidement les probables émergences de maladies et d'adapter les stratégies de contrôle en conséquence. Cela peut inclure la mise en place de systèmes de surveillance des maladies vectorielles et des moustiques, ainsi que l'utilisation de données climatiques pour prévoir les périodes de risque accru. Pratiquement, la surveillance entomologique reposera sur le piégeage et l'identification réguliers des moustiques adultes et de leurs larves pour mesurer la densité de population des vecteurs et détecter la présence d'arbovirus infectant les moustiques dans le territoire étudié. Associée aux données climatiques, une cartographie du risque épidémique pourra alors être établie afin d'anticiper de potentielles épidémies. Une utilisation réfléchie des stratégies de lutte antivectorielle sera la clé pour réduire l'impact de la dengue sur les nouvelles populations affectées [13]. Le but ultime est de réduire les densités de population de moustiques et, ainsi, réduire le risque de transmission des virus. Les méthodes d'action sont multiples : physiques, chimiques et biologiques.

La lutte physique consiste à réduire la densité des populations de vecteurs par la destruction ou la modification de gîtes larvaires (élimination des contenants d'eau, couverture des réserves d'eau, nettoyage des gouttières, élimination des déchets tels que les pneus) ou encore l'utilisation de pièges (BG sentinelle [Bio-gents], piège lumineux). La protection individuelle, par l'application de répulsifs, l'utilisation de moustiquaires, ou encore le port de vêtements couvrants, peut également être envisagée.

La lutte chimique est la méthode la plus largement utilisée depuis les années 1940. Elle repose principalement sur l'utilisation d'insecticides chimiques (les organochlorés, les organophosphorés, les pyréthrinoides, les carbamates et des régulateurs de croissance). D'autres insecticides d'origine bactérienne, isolés des bactéries *Bacillus thuringiensis* serovar *israelensis* (Bti) ou *Bacillus sphaericus* (Bs), sont utilisées comme

² La Niña est un phénomène climatique ayant pour origine une anomalie thermique des eaux équatoriales de surface de l'océan Pacifique et est caractérisée par une température anormalement basse des eaux favorable à un refroidissement local.



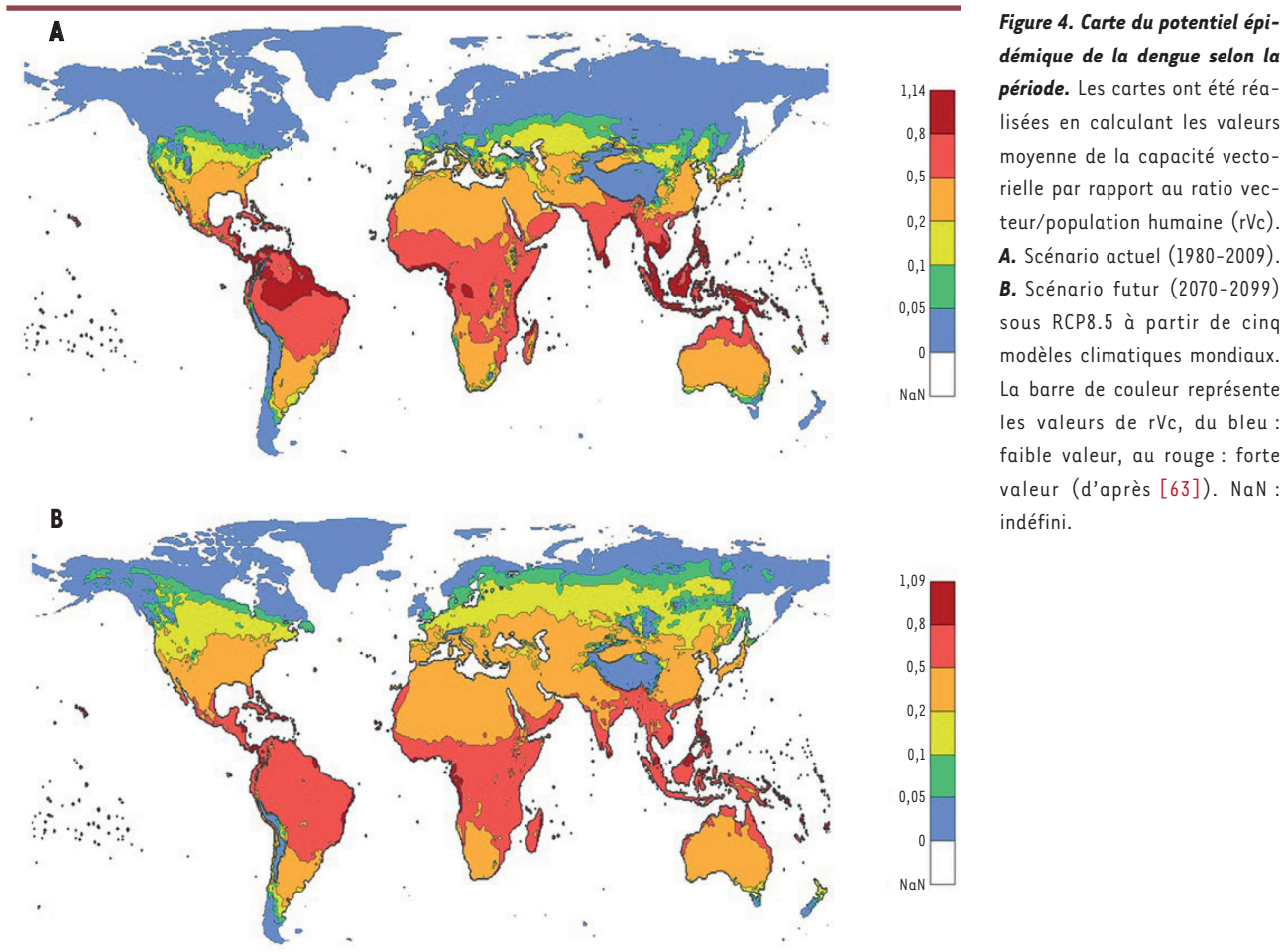


Figure 4. Carte du potentiel épidémique de la dengue selon la période. Les cartes ont été réalisées en calculant les valeurs moyenne de la capacité vectorielle par rapport au ratio vecteur/population humaine (rVc). **A.** Scénario actuel (1980-2009). **B.** Scénario futur (2070-2099) sous RCP8.5 à partir de cinq modèles climatiques mondiaux. La barre de couleur représente les valeurs de rVc , du bleu : faible valeur, au rouge : forte valeur (d'après [63]). NaN : indéfini.

larvicides. Face à la résistance aux insecticides chimiques développée par les moustiques, d'autres stratégies de lutte ont été développées, notamment, l'utilisation de bactéries *Wolbachia*³. La transfection de la souche bactérienne *wMel*, produite chez la mouche drosophile, chez *Ae. aegypti* permet de diminuer la compétence vectorielle pour différents arbovirus (DENV, CHIKV et YFV) et de baisser les densités de populations de moustiques due au phénomène d'incompatibilité cytoplasmique (stérilité produite lors de l'accouplement d'un mâle infecté par *wMel* et une femelle non infectée) [64].

Des efforts nécessitent également d'être alloués pour l'amélioration des conditions de vie des habitants afin de réduire les habitats favorables à l'installation des moustiques, tels que l'accès à l'eau potable et à un assainissement. Enfin, la sensibilisation du public et l'éducation aux pratiques de prévention individuelle jouent un rôle crucial dans la réduction de l'exposition aux piqûres de moustiques et dans la prévention des arboviroses. Ce n'est qu'en combinant toutes ces stratégies avec une approche holistique, qu'il sera possible de répondre aux enjeux liés aux impacts du changement climatique sur les arbovirus transmis par les moustiques.

Conclusion

Les modélisations réalisées tendent à montrer que la dengue risque de s'étendre au niveau mondial [63], essentiellement en raison de l'extension de l'aire de répartition des principaux moustiques vecteurs du genre *Aedes* [9]. Toutefois, l'intervalle des températures (entre un minimum et un maximum : espace en jaune dans la *Figure 3*) auxquelles le moustique survit et la température optimale auxquelles le système vectoriel est fonctionnel (mécanismes mis en jeu au niveau cellulaire et moléculaire), restent à définir pour chaque combinaison de populations de moustiques et de virus. Néanmoins, un consensus se dégage pour affirmer qu'une température supérieure à 35 °C affecte significativement la survie du moustique [34,44]. De manière générale, les modélisations pourraient être plus affinées en utilisant des paramètres climatiques comme la météo saisonnière ou en prenant en compte différents paramètres entomologiques (survie, prise de repas sanguins, etc.).

³ La bactérie *Wolbachia* bloque l'infection des moustiques par différents pathogènes humains.

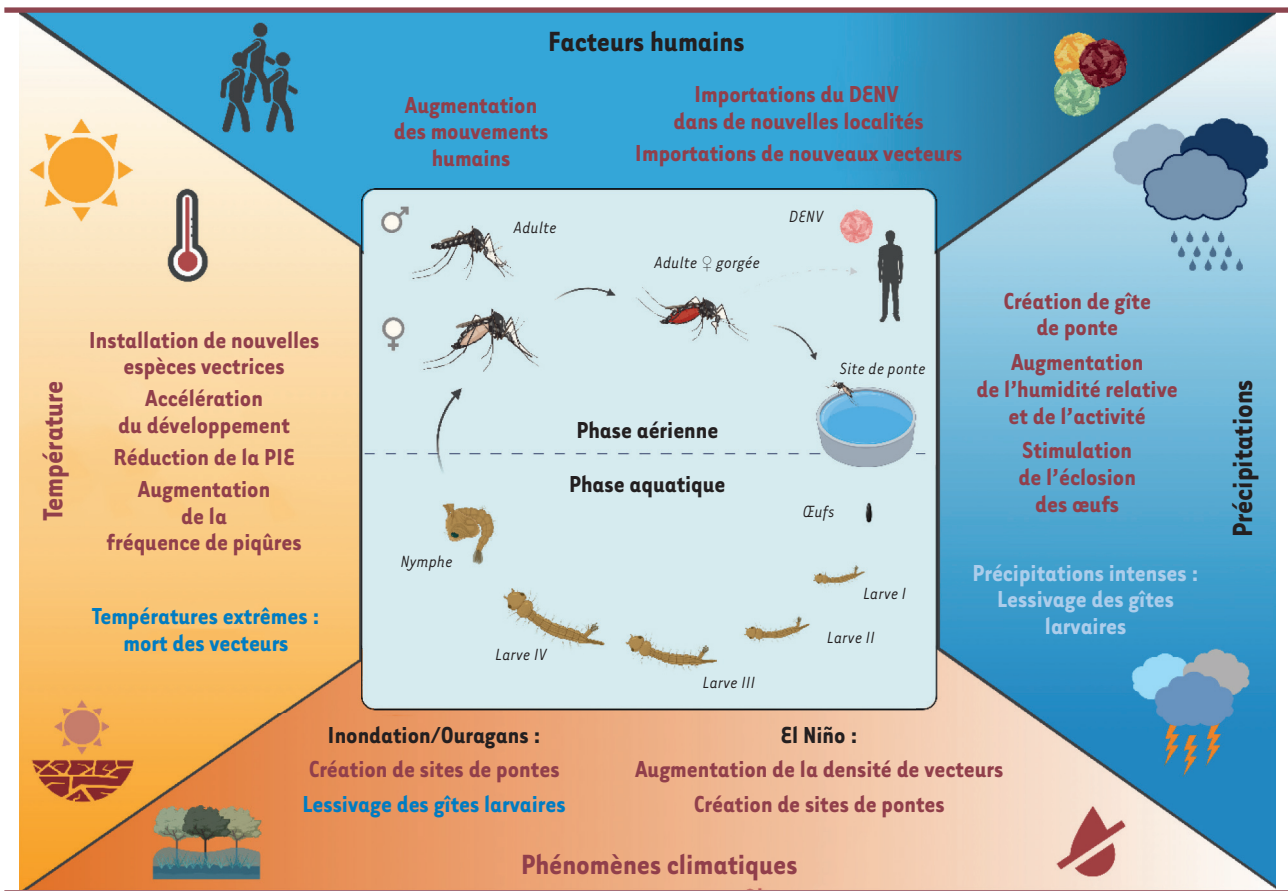


Figure 5. Impact des différents facteurs du changement climatique sur les vecteurs du DENV. PIE : période d'incubation extrinsèque ; DENV : virus de la dengue (créée avec BioRender).

La capacité vectorielle des populations de moustiques pour le DENV sera affectée par des effets directs ou indirects des différents éléments qui composent le climat (Figure 5). La prise en compte des modifications liées au changement climatique analysées pour chaque population de vecteurs permettra de mieux mesurer les risques liés à la dengue et d'affiner les stratégies de lutte antivectorielle. ♦

SUMMARY

The effects of climate change on the emergence of dengue

In recent decades, dengue has become a global issue due to its rapid spread and significant public health impact. Climate change is recognized as a key factor in the geographical spread of dengue and its vectors. Climate change affects dengue transmission through changes in temperature and precipitation, which affect both vectors and arboviruses. Climate change can also disrupt human migration patterns facilitating the spread of the virus and the invasion of vectors into new regions. Understanding the impact of climate change on dengue and its vectors is essential for developing strategies to prevent and control the disease. Appropriate mosquito control strategies, enhanced epidemiological surveillance and tailored public health systems are needed to mitigate the increasing burden of dengue in the context of climate change. ♦

LIENS D'INTÉRÊT

Les auteurs déclarent n'avoir aucun lien d'intérêt concernant les données publiées dans cet article.

RÉFÉRENCES

- Bhatt S, Gething PW, Brady OJ, et al. The global distribution and burden of dengue. *Nature* 2013 ; 496 : 504-7.
- Guzman MG, Gubler DJ, Iizquierdo A, et al. Dengue infection. *Nat Rev Dis Primer* 2016 ; 2 : 16055.
- Halstead SB. In Vivo Enhancement of Dengue Virus Infection in Rhesus Monkeys by Passively Transferred Antibody. *J Infect Dis* 1979 ; 140 : 527-33.
- Fleury HJ. *Virus émergents et ré-émergents. Virologie tropicale et subtropicale*. Paris : Elsevier Masson SAS, 2023 : 240 p.
- Zeng Z, Zhan J, Chen L, et al. Global, regional, and national dengue burden from 1990 to 2017: A systematic analysis based on the global burden of disease study 2017. *EClinicalMedicine* 2021 ; 32 : 100712.
- Stahl HC, Butenschoen VM, Tran HT, et al. Cost of dengue outbreaks: literature review and country case studies. *BMC Public Health* 2013 ; 13 : 1048.
- OMS. *L'OMS préqualifie un nouveau vaccin contre la dengue*. <https://www.who.int/fr/news/item/15-05-2024-who-prequalifies-new-dengue-vaccine>
- OMS. *Dengue et dengue sévère*. <https://www.who.int/fr/news-room/fact-sheets/detail/dengue-and-severe-dengue>
- Kraemer MU, Sinka ME, Duda KA, et al. The global distribution of the arbovirus vectors *Aedes aegypti* and *Ae. albopictus*. *eLife* 2015 ; 4 : e08347.
- Clemons A, Haugen M, Flannery E, et al. *Aedes aegypti*: an Emerging Model for Vector Mosquito Development. *Cold Spring Harb Protoc* 2010 ; 2010 : pdb.emo141.

11. Changement climatique 2021. *Les bases scientifiques physiques : résumé à l'intention des décideurs*. Contribution du groupe de travail I au sixième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), Genève, Suisse, 2021. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WG1_SPM_French.pdf
12. Messina JP, Brady OJ, Golding N, et al. The current and future global distribution and population at risk of dengue. *Nat Microbiol* 2019 ; 4 : 1508-15.
13. Thomson MC, Stanberry LR. Climate Change and Vectorborne Diseases. *N Engl J Med* 2022 ; 387 : 1969-78.
14. Environmental migration. *Migr Data Portal* 2024.
15. Bhatia S, Bansal D, Patil S, et al. A Retrospective Study of Climate Change Affecting Dengue: Evidences, Challenges and Future Directions. *Front Public Health* 2022 ; 10 : 884645.
16. Macdonald G. *The Epidemiology and Control of Malaria*. Oxford : Oxford University Press, 1957 : 201 p.
17. Adhami J, Reiter P. Introduction and establishment of *Aedes* (*Stegomyia*) *albopictus* skuse (Diptera: Culicidae) in Albania. *J Am Mosq Control Assoc* 1998 ; 14 : 340-3.
18. Dalla Pozza G, Majori G. First record of *Aedes albopictus* establishment in Italy. *J Am Mosq Control Assoc* 1992 ; 8 : 318-20.
19. Ministère de la Santé et de l'Accès aux soins. *Le moustique tigre : une implantation dans 78 départements en métropole*. <https://sante.gouv.fr/actualites/actualites-du-ministere/article/le-moustique-tigre-une-implantation-dans-78-departements-en-metropole>
20. Cunze S, Koch LK, Kochmann J, et al. *Aedes albopictus* and *Aedes japonicus* – two invasive mosquito species with different temperature niches in Europe. *Parasit Vectors* 2016 ; 9 : 573.
21. Giunti G, Becker N, Benelli G. Invasive mosquito vectors in Europe: From bioecology to surveillance and management. *Acta Trop* 2023 ; 239 : 106832.
22. Colón-González FJ, Harris I, Osborn TJ, et al. Limiting global-mean temperature increase to 1.5-2 °C could reduce the incidence and spatial spread of dengue fever in Latin America. *Proc Natl Acad Sci USA* 2018 ; 115 : 6243-8.
23. Johansson MA, Cummings DAT, Glass GE. Multiyear Climate Variability and Dengue-El Niño Southern Oscillation, Weather, and Dengue Incidence in Puerto Rico, Mexico, and Thailand: A Longitudinal Data Analysis. *PLoS Med* 2009 ; 6 : e1000168.
24. Barr JS, Estevez-Lao TY, Khalif M, et al. Temperature and age, individually and interactively, shape the size, weight, and body composition of adult female mosquitoes. *J Insect Physiol* 2023 ; 148 : 104525.
25. Huestis DL, Yaro AS, Traoré Al, et al. Variation in metabolic rate of *Anopheles gambiae* and *A. arabiensis* in a Sahelian village. *J Exp Biol* 2011 ; 214 : 2345-53.
26. González-Tokman D, Córdoba-Aguilar A, Dáttilo W, et al. Insect responses to heat: physiological mechanisms, evolution and ecological implications in a warming world. *Biol Rev* 2020 ; 95 : 802-21.
27. Schulte PM. The effects of temperature on aerobic metabolism: towards a mechanistic understanding of the responses of ectotherms to a changing environment. *J Exp Biol* 2015 ; 218 : 1856-66.
28. Scott TW, Amerasinghe PH, Morrison AC, et al. Longitudinal Studies of *Aedes aegypti* (Diptera: Culicidae) in Thailand and Puerto Rico: Blood Feeding Frequency. *J Med Entomol* 2000 ; 37 : 89-101.
29. Marchoux E, Salimbeni AT, Simond PL. *La fièvre jaune: rapport de la mission française*. Sceaux : Imprimerie Charaire, 1903.
30. Reinhold J, Lazzari C, Lahondère C. Effects of the Environmental Temperature on *Aedes aegypti* and *Aedes albopictus* Mosquitoes: A Review. *Insects* 2018 ; 9 : 158.
31. Lamy K, Tran A, Portafaix T, et al. Impact of regional climate change on the mosquito vector *Aedes albopictus* in a tropical island environment : La Réunion. *Sci Total Environ* 2023 ; 875 : 162484.
32. Rowley WA, Graham CL. The effect of temperature and relative humidity on the flight performance of female *Aedes aegypti*. *J Insect Physiol* 1968 ; 14 : 1251-7.
33. Delatte H, Gimonneau G, Triboire A, et al. Influence of Temperature on Immature Development, Survival, Longevity, Fecundity, and Gonotrophic Cycles of *Aedes albopictus*, Vector of Chikungunya and Dengue in the Indian Ocean. *J Med Entomol* 2009 ; 46 : 33-41.
34. Costanzo K, Occhino D. Effects of Temperature on Blood Feeding and Activity Levels in the Tiger Mosquito, *Aedes albopictus*. *Insects* 2023 ; 14 : 752.
35. Robert MA, Stewart-Ibarra AM, Estallo EL. Climate change and viral emergence: evidence from *Aedes*-borne arboviruses. *Curr Opin Virol* 2020 ; 40 : 41-7.
36. Blagrove MSC, Caminade C, Diggle PJ, et al. Potential for Zika virus transmission by mosquitoes in temperate climates. *Proc R Soc B Biol Sci* 2020 ; 287 : 20200119.
37. Alto BW, Wiggins K, Eastmond B, et al. Diurnal Temperature Range and Chikungunya Virus Infection in Invasive Mosquito Vectors. *J Med Entomol* 2018 ; 55 : 217-24.
38. Whitmire RE, Burke DS, Nisalak A, et al. Effect of Temperature on the Vector Efficiency of *Aedes aegypti* for Dengue 2 Virus. *Am J Trop Med Hyg* 1987 ; 36 : 143-52.
39. Terradas G, Manzano-Alvarez J, Vanalli C, et al. Temperature affects viral kinetics and vectorial capacity of *Aedes aegypti* mosquitoes co-infected with Mayaro and Dengue viruses. *bioRxiv* 2023 : 2023.05.17.541186.
40. Lim XX, Chandramohan A, Lim XYE, et al. Epitope and Paratope Mapping Reveals Temperature-Dependent Alterations in the Dengue-Antibody Interface. *Structure* 2017 ; 25 : 1391-402.e3.
41. Rey FA. Two hosts, two structures. *Nature* 2013 ; 497 : 443-4.
42. Zhang X, Sun L, Rossmann MG. Temperature dependent conformational change of dengue virus. *Curr Opin Virol* 2015 ; 12 : 109-12.
43. Bellone R, Failloux AB. The Role of Temperature in Shaping Mosquito-Borne Viruses Transmission. *Front Microbiol* 2020 ; 11 : 584846.
44. ANSES. *Influence du réchauffement climatique sur la propagation des maladies vectorielles et de leurs vecteurs*. https://www.anses.fr/fr/system/files/CNEV-Ft-Fev2016-Rapport_Changement_climatique_et_maladies_vectorielles.pdf
45. Hii YL, Zhu H, Ng N, et al. Forecast of Dengue Incidence Using Temperature and Rainfall. *PLoS Negl Trop Dis* 2012 ; 6 : e1908.
46. Fouque F, Reeder JC. Impact of past and on-going changes on climate and weather on vector-borne diseases transmission: a look at the evidence. *Infect Dis Poverty* 2019 ; 8 : 51.
47. Sang R, Lutomiah J, Said M, et al. Effects of Irrigation and Rainfall on the Population Dynamics of Rift Valley Fever and Other Arbovirus Mosquito Vectors in the Epidemic-Prone Tana River County, Kenya. *J Med Entomol* 2016 ; tjw206.
48. Brown JJ, Pascual M, Wimberly MC, et al. Humidity – The overlooked variable in the thermal biology of mosquito-borne disease. *Ecol Lett* 2023 ; 26 : 1029-49.
49. Trewin BJ, Kay BH, Darbro JM, et al. Increased container-breeding mosquito risk owing to drought-induced changes in water harvesting and storage in Brisbane, Australia. *Int Health* 2013 ; 5 : 251-8.
50. Sauerborn R, Ebi K. Climate change and natural disasters – integrating science and practice to protect health. *Glob Health Action* 2012 ; 5 : 19295.
51. Tabari H. Climate change impact on flood and extreme precipitation increases with water availability. *Sci Rep* 2020 ; 10 : 13768.
52. Ault TR. On the essentials of drought in a changing climate. *Science* 2020 ; 368 : 256-60.
53. Nosrat C, Altamirano J, Anyamba A, et al. Impact of recent climate extremes on mosquito-borne disease transmission in Kenya. *PLoS Negl Trop Dis* 2021 ; 15 : e0009182.
54. Ward HM, Qualls WA. Integrating Vector and Nuisance Mosquito Control for Severe Weather Response. *J Am Mosq Control Assoc* 2020 ; 36 : 41-8.
55. Barrera R, Felix G, Acevedo V, et al. Impacts of Hurricanes Irma and Maria on *Aedes aegypti* Populations, Aquatic Habitats, and Mosquito Infections with Dengue, Chikungunya, and Zika Viruses in Puerto Rico. *Am J Trop Med Hyg* 2019 ; 100 : 1413-20.
56. CDC. *What to Do After a Hurricane or Flood*. <https://www.cdc.gov/mosquitoes/response/index.html>
57. Chen H, Jin Y, Liu Z, et al. Central-Pacific El Niño-Southern Oscillation less predictable under greenhouse warming. *Nat Commun* 2024 ; 15 : 4370.
58. Cai W, Borlace S, Lengaigne M, et al. Increasing frequency of extreme El Niño events due to greenhouse warming. *Nat Clim Change* 2014 ; 4 : 111-6.
59. Quintero-Herrera LL, Ramírez-Jaramillo V, Bernal-Gutiérrez S, et al. Potential impact of climatic variability on the epidemiology of dengue in Risaralda, Colombia, 2010-2011. *J Infect Public Health* 2015 ; 8 : 291-7.
60. McMichael C. Climate change-related migration and infectious disease. *Virulence* 2015 ; 6 : 548-53.
61. Semenza JC, Ebi KL. Climate change impact on migration, travel, travel destinations and the tourism industry. *J Travel Med* 2019 ; 26 : taz026.
62. Harish V, Colón-González FJ, Moreira FRR, et al. Human movement and environmental barriers shape the emergence of dengue. *Nat Commun* 2024 ; 15 : 4205.
63. Liu-Helmersson J, Stenlund H, Wilder-Smith A, et al. Vectorial Capacity of *Aedes aegypti*: Effects of Temperature and Implications for Global Dengue Epidemic Potential. *PLoS One* 2014 ; 9 : e89783.
64. Moreira LA, Iturbe-Ormaetxe I, Jeffery JA, et al. A Wolbachia Symbiont in *Aedes aegypti* Limits Infection with Dengue, Chikungunya, and Plasmodium. *Cell* 2009 ; 139 : 1268-78.