

Changement climatique et maladies à transmission vectorielle : une analyse régionale

Andrew K. Githeko,¹ Steve W. Lindsay,² Ulisses E. Confalonieri³ et Jonathan A. Patz⁴

D'après les données actuelles, la variabilité interannuelle et interdécennale du climat pourrait avoir une influence directe sur l'épidémiologie des maladies à transmission vectorielle. Ces données ont été évaluées à l'échelle du continent afin de déterminer les conséquences possibles des changements climatiques prévus.

On estime que d'ici à 2100, la température moyenne de la planète s'élèvera de 1,0-3,5°C, ce qui augmentera le risque de voir de nombreuses maladies à transmission vectorielle apparaître dans de nouvelles régions. L'effet le plus marqué du changement climatique sur la transmission s'observera vraisemblablement aux extrémités de l'intervalle de températures favorable à la transmission, c'est-à-dire, pour de nombreuses maladies, vers 14-18°C et vers 35-40°C. Le paludisme et la dengue figurent parmi les plus importantes des maladies à transmission vectorielle dans les régions tropicales et subtropicales ; la maladie de Lyme est la plus courante de ce type de maladies aux Etats-Unis d'Amérique et en Europe, et les encéphalites commencent à poser un problème de santé publique. Les risques liés aux modifications du climat seront différents selon le niveau de développement de l'infrastructure sanitaire des pays.

La répartition des établissements humains dans les différentes régions influencera les tendances de la morbidité. Alors que 70 % de la population d'Amérique du Sud est urbanisée, cette proportion tombe à moins de 45 % en Afrique subsaharienne. Les anomalies climatiques associées au phénomène El Niño-oscillation australe, qui se traduisent par des sécheresses et des inondations, devraient augmenter en fréquence et en intensité. Elles ont été associées à des flambées de paludisme en Afrique, en Asie et en Amérique du Sud. Le changement climatique a des conséquences étendues et concerne tous les écosystèmes favorables à la vie. Il s'agit donc d'un facteur extrêmement important pour la santé et la survie humaines.

Article publié en anglais dans *Bulletin of the World Health Organization*, 2000, **78** (9) : 1136-1147.

Introduction

La vie humaine est tributaire de la dynamique du système climatique. Les interactions entre l'atmosphère, les océans, la biosphère terrestre et marine, la cryosphère et les terres émergées déterminent le climat à la surface de la terre (1). La concentration atmosphérique des gaz à effet de serre, dont le dioxyde de carbone, le méthane et l'oxyde nitreux, augmente, principalement sous l'effet des activités humaines telles que l'exploitation des combustibles fossiles, les modifications de l'utilisation des sols et l'agriculture (2). Une augmentation des gaz à effet de serre entraîne un réchauffement accru de l'atmosphère et de la surface terrestres.

Le présent article évalue les données relatives à l'impact passé et actuel de la variabilité climatique interannuelle et interdécennale sur les maladies à

transmission vectorielle au niveau du continent, afin de mettre en lumière d'éventuelles tendances futures, d'autant plus que la probabilité d'un changement climatique s'accroît.

On estime que d'ici à 2100, la température moyenne de la planète aura augmenté de 1,0 à 3,5°C (3), avec pour corollaire une augmentation du risque d'extension de nombreuses maladies à transmission vectorielle. Les modifications de la température, des précipitations et de l'humidité auxquelles on peut s'attendre selon différents scénarios de changement climatique affecteront la biologie et l'écologie des vecteurs et des hôtes intermédiaires et par conséquent le risque de transmission de maladies. Il y a augmentation du risque car, même si les arthropodes sont capables de réguler leur température interne en modifiant leur comportement, ils ne peuvent le faire au niveau physiologique et dépendent donc étroitement du climat pour leur survie et leur développement (4). Le climat, l'écologie des vecteurs et l'économie sociale variant d'un continent à l'autre, une analyse régionale est nécessaire.

L'effet le plus sensible du changement climatique sur la transmission s'observera vraisemblablement aux extrémités de l'intervalle de températures favorable à la transmission, c'est-à-dire, pour de nombreuses maladies, vers 14-18°C pour les températures les plus basses et 35-40°C pour les températures les plus élevées. Un réchauffement des températures minimales aura

¹ Principal Research Officer, Head, Climate and Human Health Research Unit, Centre for Vector Biology and Control Research, Kenya Medical Research Institute, PO Box 1578, Kisumu (Kenya) (mél. : Agitheko@kisian.mimcom.net). (Correspondance)

² Reader, Department of Biological Sciences, University of Durham, Durham (Angleterre).

³ Professeur, Ecole nationale de Santé publique, Rio de Janeiro (Brésil).

⁴ Assistant Professor and Director, Program on Health Effects of Global Environmental Change, Department of Environmental Health Sciences, Johns Hopkins School of Public Health, Baltimore, MD (Etats-Unis d'Amérique).

un impact non linéaire important sur la période d'incubation extrinsèque (5) et par conséquent sur la transmission des maladies, alors qu'à l'extrémité supérieure de l'intervalle, la transmission pourrait cesser. Cependant, autour de 30-32°C, la capacité vectorielle pourra augmenter de façon sensible du fait du raccourcissement de la période d'incubation extrinsèque, malgré une diminution du taux de survie des vecteurs. Des espèces de moustiques telles que le complexe *Anopheles gambiae*, *A. funestus*, *A. darlingi*, *Culex quinquefasciatus* et *Aedes aegypti* sont responsables de la transmission de la plupart des maladies vectorielles et sont sensibles aux changements de température en tant que stades immatures dans l'environnement aquatique et comme adultes. Si la température de l'eau augmente, les larves parviennent plus rapidement à maturité (6) et produisent une descendance plus nombreuse pendant la période de transmission. En climat plus chaud, les moustiques femelles adultes digèrent plus rapidement le sang et s'alimentent plus fréquemment (7), ce qui augmente l'intensité de la transmission. De même, les parasites du paludisme et les virus achèvent leur incubation extrinsèque dans l'organisme du moustique dans un délai plus court lorsque la température s'élève (8), ce qui augmente la proportion de vecteurs infectants. Un réchauffement au-dessus de 34°C a en général un impact négatif sur la survie des vecteurs et des parasites (6).

Outre l'influence directe de la température sur la biologie des vecteurs et des parasites, les modifications du régime des précipitations peuvent également avoir des effets à court et à long terme sur les habitats vectoriels. Une augmentation des précipitations peut augmenter le nombre et la qualité des gîtes larvaires de vecteurs comme les moustiques, les tiques et les gastéropodes, ainsi que la densité de la végétation, avec une influence sur les gîtes de repos. Chez les rongeurs, les réservoirs de maladies peuvent s'accroître lorsque des abris favorables et l'abondance de l'alimentation conduisent à une augmentation de la population, avec pour conséquence l'apparition de flambées de maladies. La répartition des établissements humains influence aussi les tendances de la morbidité. En Amérique du Sud, plus de 70 % de la population vit dans des villes et seule une faible proportion est exposée à des infections qui surviennent en milieu rural. En Afrique, au contraire, plus de 70 % de la population vit en zone rurale où la lutte antivectorielle, par exemple l'élimination des gîtes larvaires, est souvent difficile. La dengue est essentiellement une maladie urbaine et sera au contraire plus importante dans les communautés fortement urbanisées dont les systèmes d'alimentation en eau et d'évacuation des déchets laissent à désirer.

Un certain nombre de mises au point portant sur diverses maladies ont été récemment publiées. Le présent article apporte une perspective régionale et essaie de rendre compte des événements principaux qui surviennent en présence de différentes variations

climatiques et auxquels on peut s'attendre lors d'une modification du climat.

Afrique

Le climat tropical de l'Afrique est favorable à la plupart des grandes maladies à transmission vectorielle comme le paludisme, la schistosomiase, l'onchocercose, la trypanosomiase, la filariose, la leishmaniose, la peste, la fièvre de la Vallée du Rift, la fièvre jaune et les fièvres hémorragiques transmises par les tiques. Ce continent présente une grande diversité de complexes d'espèces vectrices qui ont la possibilité de se redistribuer dans de nouveaux habitats en fonction du climat, ce qui peut entraîner une nouvelle répartition des maladies. Ces organismes ont une sensibilité variable à la température et aux précipitations.

D'ici à 2050, on estime que le Sahara et les régions semi-arides d'Afrique australe pourraient se réchauffer de 1,6°C, tandis que des pays équatoriaux comme le Cameroun, le Kenya et l'Ouganda pourraient connaître un réchauffement de 1,4°C (3). Une analyse récente des précipitations moyennes à la surface du globe sur la période 1901-1995 indique que les tendances ne sont pas les mêmes dans les différentes parties du continent. Elles semblent en effet augmenter en Afrique de l'Est mais diminuer en Afrique de l'Ouest et du Nord (9). Il s'agit toutefois d'évaluations très générales et les tendances peuvent ne pas se vérifier à l'échelon local.

Les changements climatiques auront un impact à court et à long terme sur la transmission des maladies. Par exemple, une augmentation à court terme de la température et des précipitations, telle qu'on en a observé lors du phénomène El Niño de 1997-1998 — phénomène qui constitue un exemple de variabilité climatique interannuelle — a provoqué des épidémies de paludisme à *Plasmodium falciparum* (10) et de fièvre de la Vallée du Rift (11) au Kenya. Ces épidémies peuvent être dues à une accélération du développement du parasite et à une explosion des populations de vecteurs. Cependant, ces mêmes modifications climatiques ont entraîné une réduction de la transmission du paludisme en République-Unie de Tanzanie (12). Il semble de plus en plus que, outre les événements climatiques saisonniers extrêmes, il existe une élévation générale des températures moyennes et, dans certains cas, des précipitations (9). Par exemple, la vitesse moyenne du réchauffement en Afrique sur la période 1901-1995 a été de 0,39°C par siècle. Bien que de nombreuses régions du continent aient connu une diminution des précipitations, celles-ci ont augmenté en moyenne de 300 mm par siècle en Afrique de l'Est. Ces modifications sont susceptibles de favoriser un développement rapide des vecteurs et des parasites du paludisme dans des régions où la transmission était auparavant limitée par les températures trop basses. En revanche, une accélération du réchauffement aura un effet négatif sur la transmission à l'extrémité supérieure de

l'intervalle de températures supporté par les vecteurs du paludisme. L'effet négatif de la diminution des précipitations et de la sécheresse a été observé au Sénégal, où *A. funestus* a pratiquement disparu et où la prévalence du paludisme a chuté de plus de 60 % au cours des 30 dernières années (13).

Des espèces vectrices d'Afrique se sont adaptées à des écosystèmes allant de la forêt ombrophile à la savane sèche. Toute modification de ces écosystèmes entraînera une modification de la distribution des espèces vectrices. Par exemple, en ce qui concerne les vecteurs de la trypanosomiase, bien que *Glossina morsitans* soit essentiellement une espèce de savane, *G. palpalis* est une espèce riveraine préférant la végétation dense. Les facteurs qui modifient les gîtes de repos des mouches tsé-tsé adultes, par exemple une modification prolongée des précipitations, peuvent affecter l'épidémiologie et la transmission de la trypanosomiase, même si la végétation ne se modifie que lentement. *Anopheles gambiae* préfère les zones chaudes et humides, tandis que *A. arabiensis* s'est adapté à des climats plus secs (14). La distribution et l'abondance relative de ces espèces peuvent être prévues avec une exactitude satisfaisante au moyen des modèles climatiques actuels (15) et peuvent être utilisées pour indiquer les modifications futures de la distribution des vecteurs associées aux changements climatiques. Au Sénégal, les gastéropodes de l'espèce *Biomphalaria pfeifferi* transmettent *Schistosoma mansoni* pendant la saison des pluies, tandis que *Bulinus globosus* est responsable de la transmission de *S. haematobium* pendant la saison sèche (16). En République-Unie de Tanzanie, le profil des précipitations a une influence marquée sur la densité de *B. globosus* (17). De plus, une simulation réalisée à partir de données recueillies au Zimbabwe et tenant compte de diverses valeurs des précipitations annuelles a permis de prévoir des fluctuations de l'abondance de *B. globosus* de l'ordre de 1 à 100 sur des durées de dix ans ou plus (18). Les modifications à long terme des précipitations peuvent donc de façon prévisible modifier la distribution des gastéropodes et par suite celle de la maladie.

Les stratégies d'adaptation aux variations climatiques, comme l'irrigation, peuvent augmenter le risque de transmission du paludisme (19) et de la schistosomiase (20).

Des facteurs comme la situation socio-économique, les comportements favorables à la santé, l'emplacement géographique et la croissance démographique détermineront la vulnérabilité des populations aux changements climatiques. Par exemple, à l'exception de l'Afrique du Sud, un grand nombre des pays touchés par le paludisme des hauts plateaux, comme l'Éthiopie, le Kenya, Madagascar, l'Ouganda, la République-Unie de Tanzanie, le Rwanda et le Zimbabwe, ont un produit intérieur brut par habitant compris entre US \$106,8 et US \$505,5 et, pour nombre d'entre eux, le revenu est en diminution (21). Les ressources consacrées à la santé au niveau collectif et individuel pourraient s'en ressentir. De

plus, la chloroquine, qui constitue la base du traitement antipaludique depuis des dizaines d'années, s'est révélée inefficace dans de nombreuses parties du monde, notamment contre le paludisme à falciparum. D'autres médicaments ont été mis au point, mais ils ont fréquemment une moins bonne innocuité et sont 50-700 % plus chers que la chloroquine (22). Dans un grand nombre de pays parmi les plus pauvres, plus de 60 % des cas de paludisme sont traités à domicile (23), ce qui risque maintenant d'entraîner des échecs thérapeutiques dus à la pharmacorésistance, en particulier parmi les populations non immunes.

La destruction des forêts pour créer de nouveaux établissements humains peut entraîner un réchauffement local de 3-4°C (24) et, en même temps, créer des gîtes larvaires pour les vecteurs du paludisme. Ces phénomènes peuvent avoir de graves conséquences sur la transmission du paludisme dans les hauts plateaux africains.

À l'équateur, par exemple sur les hauts plateaux d'Afrique de l'Est, la transmission du paludisme peut devenir plus intense en altitude (25) où les habitants ne sont que faiblement immunisés. Plus au sud, en Afrique australe, la transmission sera probablement plus intense au-dessus de 1200 m. Des conditions météorologiques extrêmes provoquant des inondations intensifieront la transmission du paludisme et de la fièvre de la vallée du Rift (26). Depuis 1988, on a signalé de nombreuses épidémies de paludisme en Afrique orientale et australe. Par exemple, des épidémies se sont étendues de 3 à 13 districts dans l'ouest du Kenya et, dans certaines régions, des flambées s'observent chaque année (27). Au cours de cette période, la moyenne des températures mensuelles maximales s'est élevée d'environ 2°C dans la région située, en latitude, entre 2° N et 2° S et, en longitude, entre 30° et 40° E (A. K. Githeko, données non publiées, 1999). D'autres épidémies de paludisme liées au climat ont été rapportées au Rwanda (28) et en République-Unie de Tanzanie (29). Dans l'ouest du Kenya, la moyenne annuelle des températures mensuelles à 2000 m a été de 18°C, limite inférieure de température pour la transmission de *P. falciparum*. Théoriquement, un nouveau réchauffement devrait toucher les régions situées au-dessus de 2000 m en Afrique de l'Est.

Les épisodes actuels de variabilité climatique en Afrique vont probablement intensifier la transmission du paludisme dans les hauts plateaux de l'est et du sud, mais leurs effets sur la transmission d'autres maladies vectorielles moins sensibles au climat sont encore mal connus.

Alors que le climat est un cofacteur important de l'épidémiologie du paludisme, la pharmacorésistance, la baisse du pouvoir d'achat et la faiblesse des infrastructures sanitaires peuvent jouer un rôle plus important, de même que les outils et ressources permettant de réduire l'impact de la maladie. De plus, le changement climatique devrait affecter en premier lieu les hauts plateaux, alors que la pharmacorésistance touche l'ensemble des régions où sévit le paludisme.

Europe

L'Europe s'est réchauffée en moyenne de 0,8°C au cours des 100 dernières années (2). Ce changement n'est pas uniforme, le réchauffement le plus important concernant l'hiver et les régions septentrionales. Si cette tendance se poursuit, il est probable que la forte mortalité hivernale des vecteurs baissera et que de nouvelles régions deviendront propices à la transmission. Les modifications du régime des précipitations sont moins prévisibles, même s'il est probable que le climat deviendra plus humide en hiver et plus sec en été. Tandis que le nord du continent deviendra plus humide, le sud et l'est deviendront plus secs (2). Les conséquences de ces modifications sont difficiles à prévoir. Par exemple, dans les régions où les précipitations diminuent et où les marécages s'assèchent, il pourrait se trouver moins de gîtes larvaires potentiels pour les moustiques. Cependant, une telle réduction pourrait être en partie compensée par l'utilisation par les moustiques d'autres gîtes, comme les mares se formant dans les lits de rivière en voie d'assèchement ou les réservoirs utilisés par les jardiniers pour stocker l'eau de pluie.

Les plus importantes des maladies à transmission vectorielle en Europe et dans certains pays de l'ex-Union soviétique sont le paludisme, transmis par les moustiques, et la maladie de Lyme, transmise par les tiques. Les preuves du rôle des variations climatiques dans l'augmentation du risque de transmission de telles maladies sont minces car les modifications du climat sont encore relativement peu importantes par rapport à l'impact majeur des bouleversements de l'environnement créés par l'expansion démographique, les modifications des pratiques agricoles et les changements de conditions socio-économiques. Il ne faut cependant pas négliger l'existence d'un risque réel d'augmentation et d'expansion des maladies à transmission vectorielle dans de nombreuses régions d'Europe.

Le paludisme était autrefois très répandu en Europe (30, 31) et s'étendait au nord presque jusqu'au cercle polaire arctique (32), même si on le trouvait plus souvent à la limite septentrionale du pourtour méditerranéen et dans la partie orientale de l'Europe continentale. Des flambées répétées s'observaient en Europe orientale, en Arménie, en Azerbaïdjan, au Tadjikistan et en Turquie (33). Cependant, aucune n'était associée à des modifications climatiques, mais plutôt à une dégradation des conditions socio-économiques, à la mise en œuvre de plans d'irrigation, aux déplacements de personnes infectées et à l'abandon des activités de lutte antipaludique.

La transmission locale du paludisme en Europe occidentale est possible, mais devrait se limiter à quelques cas sporadiques. En Italie, où le paludisme a été éradiqué il y a 40 ans, on a récemment observé une transmission locale du paludisme à *vivax* (34, 35). Le climat d'Europe occidentale est plus approprié à la transmission du paludisme à *vivax*, un parasite plus bénin, qu'à celle du paludisme à *falciparum*,

fréquemment mortel, du fait surtout que *Plasmodium vivax* peut se développer plus rapidement aux basses températures (36). La dynamique de la transmission est d'autant plus compliquée que les vecteurs peuvent ne transmettre que certaines souches d'un parasite. Par exemple, le vecteur *Anopheles atroparvus* est réfractaire aux souches tropicales du paludisme à *falciparum* (37-39), mais non aux souches européennes (40, 41). Les modifications du climat peuvent contribuer à l'expansion de la maladie vers le nord (42). Cependant, dans les nouveaux Etats indépendants d'Europe orientale la pauvreté croissante, les mouvements massifs de réfugiés et de personnes déplacées et l'appauvrissement des systèmes de santé constituent des facteurs beaucoup plus importants car tous contribuent à l'augmentation du paludisme.

Des flambées occasionnelles de paludisme peuvent survenir en Europe lorsque des moustiques infectants sont importés des tropiques par avion. Depuis 1969, 60 cas de ce type ont été rapportés dans divers pays d'Europe (43). Le nombre croissant de patients qui contractent le paludisme lors de voyages à l'étranger constitue un problème encore plus grave. Au Royaume-Uni, 2000 cas de ce type surviennent chaque année (D. Warhurst, communication personnelle). Ces cas sont particulièrement préoccupants du fait de la propagation rapide des souches polypharmacorésistantes du parasite ; l'apparition de cas de paludisme incurable est une possibilité réelle.

A mesure que le climat se réchauffera, de nombreux vecteurs, et non uniquement ceux qui transmettent le paludisme, élargiront probablement leur aire de répartition en Europe et de nouvelles espèces vectrices pourront être introduites depuis les tropiques. Un vecteur majeur de la dengue, *Aedes albopictus*, s'est propagé dans 22 provinces du nord de l'Italie après avoir été introduit il y a huit ans (44). Les arbovirus transmis par des moustiques peuvent être à l'origine d'une morbidité et d'une mortalité importantes en Europe (45). Le virus West Nile a provoqué des flambées en France dans les années 60 et en Roumanie en 1996. Il y a également eu des flambées de maladie à virus Sindbis en Europe du Nord au cours des vingt dernières années, et de nombreuses autres infections virales ont été rapportées. Il est extrêmement difficile de prédire quand et où ces flambées se produiront, mais il est possible de définir des zones propices à la transmission si la zone climatique de résidence du vecteur peut être identifiée et cartographiée (46).

La distribution des tiques suit elle aussi étroitement le climat, et il est de plus en plus préoccupant que des maladies transmises par ces vecteurs, comme la maladie de Lyme et l'encéphalite à tiques, pourraient s'étendre en Europe du Nord (47). Bien que les tiques adultes femelles soient souvent infectées, ce sont les nymphes, beaucoup plus abondantes, qui constituent la source majeure d'infection. Les larves et nymphes de tiques se nourrissent sur de petits vertébrés comme les souris et les oiseaux, alors que les adultes préfèrent les hôtes de plus grande taille, comme les cervidés et les bovins

(48). Les hivers doux réduisent la mortalité des tiques et de leurs hôtes et allongent la période d'activité des tiques, alors que les étés secs augmentent leur mortalité. Il a été récemment démontré que le déplacement vers le nord de la tique *Ixodes ricinus* en Suède était lié au radoucissement du climat au cours des années 90 (49). Il faut toutefois prendre cette information avec précaution, car cette évolution peut également être liée à la plus grande abondance des hôtes, par exemple les rennes.

La leishmaniose est endémique dans de nombreuses parties d'Europe du Sud et représente une co-infection importante avec le virus de l'immunodéficience humaine (VIH). Depuis 1990, on a rapporté 1616 cas de co-infection essentiellement en Espagne, dans le sud de la France et en Italie (50). A mesure que le climat se réchauffera, les phlébotomes vecteurs de leishmaniose pourront devenir plus abondants et étendre leur aire de répartition vers le nord. Les étés longs et chauds sont également les conditions idéales pour d'autres diptères et il est possible que l'on assiste à une augmentation du nombre de diarrhées transmises par la mouche domestique, *Musca domestica*, et d'autres espèces de diptères synanthropes.

Des observations sporadiques de paludisme, de maladie de Lyme et de leishmaniose ont été rapportées en Europe occidentale, mais, grâce à une surveillance efficace et à la qualité de l'infrastructure sanitaire, il est possible d'empêcher des flambées de grande ampleur. Cela n'est toutefois peut-être pas le cas dans certains pays d'Europe orientale. De plus, le déclin économique et les guerres civiles peuvent favoriser l'apparition de conditions propices aux flambées de maladies.

Amérique du Sud

En Amérique du Sud, en ce qui concerne le nombre de personnes atteintes, les principales maladies à transmission vectorielle sensibles au climat sont le paludisme, la leishmaniose, la dengue, la maladie de Chagas et la schistosomiase. Le Tableau 1 indique le nombre de cas de ces maladies rapportés à l'Organisation panaméricaine de la Santé en 1997 (51).

Tableau 1. **Distribution des cas de maladies à transmission vectorielle en Amérique du Sud notifiées à l'Organisation panaméricaine de la Santé en 1996** (réf. 51)

Maladie	Nombre de cas
Paludisme	877 851
Dengue	276 758
Maladie de Chagas ^a	5 235 000
Schistosomiase	181 650

^a Le nombre de cas de maladie de Chagas a été estimé d'après le nombre de personnes exposées.

Ces dernières années, le nombre de nouveaux cas de leishmaniose cutanée est passé de 250 par an en Bolivie (1975-1991) à 24 600 au Brésil (1992) et on comptait environ 9200 cas d'onchocercose en 1992 dans divers pays dont la Colombie, le Guatemala et le Venezuela (52).

Parmi les autres maladies à transmission vectorielle dont un nombre relativement faible de cas surviennent chaque année, et qui peuvent être sensibles aux variations climatiques, figurent la fièvre jaune (522 cas en 1995), la peste (55 cas en 1996), l'encéphalite équine du Venezuela (25 546 cas en 1995) et d'autres arboviroses (51). Jusqu'en 1991, dans la seule région amazonienne au Brésil, 183 types différents d'arbovirus ont été isolés et 34 sont connus pour provoquer des maladies humaines, parfois sous forme d'épidémies explosives. L'un d'entre eux, le virus de la fièvre d'Oropouche, suit des cycles associés au début de la saison des pluies (53).

La plus répandue et la plus grave des maladies à transmission vectorielle sensibles au climat en Amérique du Sud est le paludisme. Il a été démontré que des conditions exceptionnellement sèches (par exemple, dans la partie nord, les conditions météorologiques associées au phénomène El Niño-oscillation australe) sont accompagnées ou suivies d'une augmentation de l'incidence de la maladie, comme cela s'est produit en Colombie (54, 55) et au Venezuela (56).

Des observations préliminaires dans le nord du Brésil ont indiqué une tendance à la baisse de la prévalence du paludisme au cours de l'année du phénomène El Niño-oscillation australe (sécheresse), avec une disparition des pics saisonniers habituels de la maladie. Celle-ci a eu tendance à retrouver ses niveaux endémique et épidémique antérieurs vers la fin de l'année suivant le phénomène El Niño-oscillation australe, lorsque les précipitations ont retrouvé leur niveau habituel (U. Confalonieri, données non publiées, 1999). En revanche, en Bolivie (57), en Equateur (58) et au Pérou (59), le phénomène inverse a été observé; le paludisme a augmenté après les inondations qui ont suivi les fortes pluies associées au phénomène El Niño-oscillation australe de 1982-1983. De plus, en Equateur, des facteurs indirects tels que les mouvements de population et la désorganisation des services de santé ont contribué à l'épidémie (59).

Les fortes pluies associées au phénomène El Niño-oscillation australe de 1991-1992 ont été liées à une extension des vecteurs du paludisme à partir de leurs zones d'endémie, du Paraguay en Argentine (60). Des modifications de l'écosystème tempéré de la partie australe de l'Amérique du Sud provoquées par les variations climatiques permettraient à *Anopheles darlingi* d'étendre son habitat vers le sud (61, 62).

Des estimations récentes basées sur le modèle du Hadley Centre de système couplé océan-atmosphère (HadCM3) ont permis d'établir des projections selon lesquelles le nombre supplémentaire de personnes exposées au risque d'infection du

fait de la persistance de la transmission du paludisme pendant toute l'année en Amérique du Sud serait de 25 millions en 2020 et de 50 millions en 2080 (63).

L'impact des modifications du climat sur le volume annuel des eaux de ruissellement en Amérique du Sud a été étudié au moyen de divers modèles de circulation générale (64). Les scénarios de modifications climatiques prévoient régulièrement une augmentation du volume de ruissellement sur le nord-ouest de l'Amérique du Sud, où l'on sait que le paludisme est endémique. Bien que l'importance de l'humidité des sols pour la reproduction des anophèles vecteurs ait été démontrée en Afrique (65), l'association entre le cycle hydrologique et la transmission du paludisme n'a pas fait l'objet d'études empiriques dans les Amériques.

Dans le nord-est de l'Amérique du Sud, région soumise à des sécheresses régulières, une résurgence de la leishmaniose viscérale (kala-azar) a été observée, par exemple dans certaines zones urbaines du Brésil (66, 67). A São Luis et à Teresina, d'importantes épidémies ont été observées en 1983-1985 et 1992-1994, périodes qui ont coïncidé avec les grandes sécheresses dues à El Niño. Dans l'Etat de Maranhão (Brésil), près de la région amazonienne, une importante augmentation du paludisme importé a également été observée au début des années 80, phénomène qui est devenu par la suite plus fréquent que la forme autochtone de la maladie. L'explication la plus plausible serait une influence des migrations humaines liées à la sécheresse. Dans le cas des flambées de kala-azar, des populations ont émigré des zones rurales d'endémie vers les villes à la recherche d'un travail ou d'une aide du gouvernement du fait de la perte de leurs récoltes, alors que dans le cas de l'augmentation du paludisme importé, il semble que les migrants se soient déplacés vers la région voisine de l'Amazone, qui est une zone d'endémie, à la recherche d'un travail temporaire puis, qu'avec la fin de la sécheresse, ils aient importé les nouveaux cas de maladie en rentrant dans leur région d'origine (U. Confalonieri, données non publiées, 1999).

On a peu de données sur l'impact possible des modifications du climat sur la forêt tropicale amazonienne, source naturelle de dizaines d'arboviroses sylvatiques connues, essentiellement limitées à la forêt ombrophile, et probablement d'un nombre encore plus grand restant à découvrir. Des modèles récents d'interactions entre le climat et la couverture végétale ont montré que la déforestation dans la région amazonienne pourrait avoir un impact significatif sur la dynamique du climat dans la région (68-70). L'augmentation locale de la température due à la déforestation dans cette région pourrait dépasser celle que prévoient les modèles de changement climatique à l'échelle mondiale en prenant l'hypothèse d'un doublement des émissions de dioxyde de carbone. Si la déforestation se poursuit, il faut s'attendre à des conditions plus sèches qui auront un impact sur la dynamique des maladies infectieuses, notamment celles qui sont associées aux vecteurs et aux réservoirs sylvatiques comme le paludisme, la

leishmaniose et les arboviroses, par le biais de mécanismes possibles tels que des modifications des conditions physiques qui déterminent la survie des vecteurs (humidité, gîtes larvaires) et des influences sur les prédateurs des insectes et les vertébrés réservoirs de maladie (71).

Les oscillations climatiques peuvent modifier la dynamique de la dengue (72), maladie transmise par *Aedes aegypti*, un moustique à prédominance urbaine. En Amérique latine, autour de 81 millions d'habitants vivent dans des zones urbaines et la maladie y a progressé au cours des dix dernières années (51). L'influence de l'augmentation de la température sur l'intensité et la distribution de la transmission de la dengue sur les différents continents a été évaluée (73). Avec une augmentation de 2°C d'ici la fin du siècle prochain (2), le potentiel moyen d'intensité de la transmission pourrait être multiplié par 2 à 5 dans la plus grande partie de l'Amérique du Sud. De nouvelles zones de transmission devraient également apparaître dans la partie australe du continent.

En résumé, il est probable que les effets marqués d'El Niño sur les régions équatoriales de l'Amérique du Sud intensifieront la transmission du paludisme et de la dengue. Les migrations humaines liées à la sécheresse, à la dégradation de l'environnement et à des raisons économiques peuvent contribuer à propager la maladie de façon imprévisible, et de nouveaux gîtes larvaires pour les vecteurs peuvent être créés à la faveur de l'augmentation de la pauvreté dans les zones urbaines, ainsi que de la déforestation et de la dégradation de l'environnement dans les zones rurales. Les changements climatiques exacerberont ces effets.

Amérique du Nord

Depuis 1900, les températures journalières moyennes aux Etats-Unis (hors Etats insulaires) ont augmenté d'environ 0,4°C, essentiellement au cours des 30 dernières années (74). Des études récentes ont montré que le cycle hydrologique varie, avec une augmentation de la nébulosité et des précipitations (75). Les extrêmes des précipitations ont également changé, avec davantage de fortes précipitations et moins de faibles précipitations (74, 76). Il est de plus en plus net que l'on se trouve en présence de changements mesurables des tendances climatiques (77).

Les risques sanitaires qui découlent de ces changements climatiques différeront d'un pays à l'autre en fonction de leur infrastructure de santé. Au Canada et aux Etats-Unis d'Amérique, une surveillance efficace et des programmes de lutte antivectorielle de bonne qualité limitent la transmission sur le mode endémique de maladies comme le paludisme et la dengue. L'infrastructure sanitaire du Mexique et d'autres pays moins développés n'est pas aussi efficace. Même dans les pays développés, l'augmentation des voyages internationaux et la sous-notification manifeste des cas montrent qu'il

existe un risque permanent et qu'une surveillance rigoureuse est nécessaire (78).

La récente importation de l'encéphalite à virus West Nile dans la région de New York en 1999 a marqué la première observation de la présence de ce virus en Amérique du Nord (79). On ne sait pas encore si la sécheresse exceptionnelle qui a sévi pendant l'été 1999 le long de la côte Est a affecté les populations de moustiques du genre *Culex* capables d'héberger le virus. Les oiseaux sont les hôtes naturels du virus West Nile.

La tique ixodide, *Ixodes scapularis*, transmet *Borrelia burgdorferi*, un spirochète responsable de la maladie de Lyme, la plus courante des maladies à transmission vectorielle aux Etats-Unis d'Amérique avec 15 934 cas en 1998. Parmi les autres maladies transmises par des tiques figurent la fièvre pourprée des Montagnes Rocheuses et l'ehrlichiose, cette dernière ayant été reconnue pour la première fois au milieu des années 80. Les populations de tiques et de mammifères hôtes concernées sont influencées par l'utilisation des sols et le couvert végétal, le type de sol, l'altitude ainsi que par le moment, la durée et la vitesse des variations de la température et des précipitations (80, 81). Les relations entre les paramètres des divers stades du cycle évolutif du vecteur et les conditions climatiques ont été vérifiées de façon expérimentale sur le terrain et en laboratoire (80). Une modélisation a montré que la fièvre pourprée des Montagnes Rocheuses pourrait diminuer dans les Etats du sud des Etats-Unis du fait de l'intolérance de la tique aux températures élevées et aux faibles degrés hygrométriques (82).

Une relation avec la température a été observée dans le cas d'une transmission sporadique locale du paludisme à New York et dans le New Jersey pendant les années 90 ; le point commun entre ces flambées était leur survenue pendant des conditions météorologiques exceptionnellement chaudes et humides qui ont suffisamment réduit le temps de développement des sporozoïtes pour rendre les anophèles de ces latitudes infectants (83, 84). Cependant, même lorsque les conditions climatiques favorisaient la transmission locale, les flambées sont restées d'ampleur limitée.

La dengue et la dengue hémorragique sont en augmentation dans les Amériques (85, 86). A Porto Rico, on signale en moyenne 10 000 cas de dengue par an, et cette infection se rencontre maintenant dans la quasi-totalité des pays des Caraïbes et au Mexique, et a périodiquement sévi sur le mode endémique au Texas au cours des deux dernières décennies. Les virus de la dengue se rencontrent essentiellement sous les tropiques, entre 30° de latitude N et 20° de latitude S (87), car les gelées ou les froids prolongés tuent les moustiques adultes, les oeufs et les larves pendant l'hiver (88, 89). Comme on l'a vu, des études de modélisation à l'échelle mondiale ont examiné le potentiel de transmission selon divers scénarios de changement climatique (73, 90). La dengue dépend toutefois fortement des facteurs environnementaux locaux. Le

changement potentiel de risque a été analysé pour trois sites, Brownsville (Texas), La Nouvelle-Orléans (Louisiane) et Porto Rico (plusieurs sites) dans le cadre de l'évaluation nationale réalisée aux Etats-Unis d'Amérique sur la variabilité du climat et les changements climatiques (Dana Focks et al., données non publiées, 2000). Jusqu'à présent, seule l'analyse pour Brownsville a été achevée. L'utilisation d'un scénario de changement climatique transitoire, fondé sur le modèle du Hadley Centre de système couplé océan-atmosphère (HadCM2), indique que le degré hygrométrique baisse considérablement dans le sud du Texas à mesure que la température s'élève. Le potentiel de transmission donné par ce modèle pour la dengue diminuait pour ce site. Il se peut que la situation soit différente à Porto Rico du fait de son insularité.

Parmi les cas d'encéphalite rapportés aux Etats-Unis d'Amérique, la plupart sont transmis par des moustiques. L'encéphalite de Saint-Louis a la plus forte prévalence (91) ; on peut également observer des encéphalites de La Crosse et des encéphalites équines de l'Ouest, de l'Est et du Venezuela. Même si la longévité des moustiques diminue à mesure que la température s'élève, les taux de transmission des virus (comme pour la dengue) augmentent fortement à température élevée (92-94). D'après des études de terrain menées en Californie, il est possible de prédire qu'une augmentation de la température de 3-5°C entraînera un important déplacement vers le nord des flambées d'encéphalite équine de l'Ouest et d'encéphalite de Saint-Louis, et une disparition de l'encéphalite équine de l'Ouest et du Venezuela dans les régions d'endémie méridionales (94). Les flambées humaines d'encéphalite de Saint-Louis sont corrélées avec des périodes de canicule pendant lesquelles la température dépasse 30°C pendant plusieurs jours (95), comme lors de l'épidémie de 1984 en Californie. L'analyse informatique des données climatiques mensuelles a montré qu'un excès de précipitations en janvier et février, associé à une sécheresse en juillet, précède le plus souvent les flambées (96). Une telle succession d'hivers chauds et humides et d'étés chauds et secs ressemble à certaines des projections des modifications climatiques basées sur les modèles de circulation générale pour la plus grande partie des Etats-Unis (97, 98). L'encéphalite équine de l'Est a été associée à des étés chauds et humides le long de la côte Est des Etats-Unis (99).

L'épidémie due à des hantavirus pulmonaires dans le sud-ouest des Etats-Unis d'Amérique a été attribuée à une résurgence des populations de rongeurs liée aux conditions climatiques et écologiques (100, 101) ; après six années de sécheresse suivies par des pluies extrêmement fortes au printemps 1993, la population de *Peromyscus*, un petit rongeur qui peut héberger des hantavirus, a été multipliée par dix. Des cas groupés de la maladie ont été géographiquement reliés à des zones de fortes précipitations et de végétation abondante à la suite de phénomènes El Niño (102). De même, l'incidence de la peste transmise par les puces montre une association

positive avec des périodes antécédentes de fortes précipitations dans la région (103).

La leptospirose, une maladie transmise par les rongeurs, a été associée à des inondations en Amérique centrale. Par exemple, au Nicaragua, une étude cas-témoins de l'épidémie de 1995 a révélé que le risque de maladie était multiplié par 15 chez les personnes ayant marché dans les eaux en crue (104). La leptospirose est rarement signalée aux Etats-Unis d'Amérique. Cependant, cette maladie est sous-diagnostiquée (105).

La maladie de Lyme et les encéphalites constitueront de plus en plus une menace pour la santé publique aux Etats-Unis d'Amérique dans la mesure où les conditions appropriées pour leur transmission se multiplient. Cependant, avec l'amélioration des connaissances sur la relation entre le climat et ces maladies, et avec l'amélioration des prévisions climatiques, les méthodes de prévention des flambées, par exemple grâce à l'information du public, s'amélioreront aussi. La maladie de Lyme, bien que curable, reste difficile à diagnostiquer ; les tests de laboratoire classiques actuellement disponibles ne sont pas entièrement satisfaisants, car ils manquent de sensibilité et de spécificité et ne sont pas suffisamment normalisés. Le sous-diagnostic pose un problème dans les régions des Etats-Unis où la maladie n'est pas endémique ou est relativement rare. Le nombre de rongeurs et de cervidés dans une région influence le nombre de tiques que l'on y trouve. Le récent renouveau de la population de cervidés dans le nord-est des Etats-Unis et l'extension des zones suburbaines vers les zones rurales où les tiques de cervidés sont courantes sont probablement les principaux facteurs d'augmentation de la prévalence.

Asie, Australie et îles du Pacifique occidental

L'Asie recouvre des régions de climat tropical et de climat tempéré. Le paludisme à *Plasmodium falciparum* et à *P. vivax*, la dengue, la dengue hémorragique et la schistosomiase sont endémiques dans diverses régions d'Asie tropicale. Au cours des 100 dernières années, les températures moyennes en surface ont augmenté de 0,3-0,8°C sur le continent et les projections font état d'une augmentation de 0,4-4,5°C d'ici à 2070 (3).

Une augmentation des températures, des précipitations et du degré hygrométrique pendant certains mois dans la province de la frontière du Nord-Ouest au Pakistan a été associée à une augmentation de l'incidence du paludisme à *P. falciparum* (106). Dans le nord-est du Pendjab, les épidémies de paludisme sont multipliées par cinq l'année suivant un phénomène El Niño, alors qu'à Sri Lanka le risque d'épidémies de paludisme est quadruplé pendant une année El Niño. Au Pendjab, les épidémies sont associées à des précipitations

supérieures à la normale et, à Sri Lanka, à des précipitations inférieures à la normale (107).

Selon l'OMS, de nombreux pays d'Asie ont connu des taux exceptionnellement élevés de dengue et/ou de dengue hémorragique en 1998 par rapport aux autres années. Des modifications des conditions météorologiques, par exemple les phénomènes El Niño, pourraient être les facteurs les plus importants (108), car des expériences de laboratoire ont démontré que la période d'incubation du virus de la dengue 2 pouvait tomber de 12 jours à 30°C à 7 jours à 32°C-35°C chez *Aedes aegypti* (5). La dengue a été signalée dans plusieurs petits Etats insulaires du Pacifique où les précipitations et les températures locales sont corrélées avec l'indice d'oscillation australe, une composante du phénomène El Niño-oscillation australe. De plus, une corrélation positive a été trouvée entre l'indice et la dengue dans 10 de ces Etats insulaires sur 14 (109).

En Asie orientale et dans le Pacifique, 41 à 79 % du produit intérieur brut provient essentiellement des zones urbaines. Les taux d'urbanisation vont de 16 % en Papouasie-Nouvelle-Guinée et 19 % au Viet Nam à 82 % en République de Corée, et le rythme d'urbanisation prévu dans cette région pour la période 2000-2005 est d'environ 3,5 %. Cette tendance aggravera encore le risque de transmission de maladies (A. K. Githeko, données non publiées, 1999).

En Australie, les principales maladies à transmission vectorielle sont dues aux virus Ross River et Barmah Forest, qui provoquent des arthrites, et au virus de la vallée de la Murray, qui provoque des encéphalites. La transmission de ces virus est associée à l'existence de gîtes larvaires de moustiques et de conditions environnementales favorables (110). Les inondations ont également été associées à des flambées de maladies virales.

Des scénarios climatiques pour l'Australie en 2030 indiquent une augmentation des températures de 0,3-1,4°C, avec une tendance générale à la diminution des précipitations. Cependant, au cours des dernières décennies, les précipitations moyennes semblent avoir augmenté de 14 % et les fortes précipitations de 10 à 20 %. Le climat australien présente une forte variabilité (3).

En Nouvelle-Zélande, on s'est inquiété de la menace que pourraient constituer, pour une population dont une grande partie ne possède pas d'anticorps protecteurs, les modifications des conditions environnementales, par exemple un réchauffement général avec ses effets concomitants sur la distribution des vecteurs, les voyages aériens de plus en plus rapides que peuvent effectuer des personnes virémiques, et l'introduction accidentelle de nouveaux moustiques vecteurs, notamment *Aedes albopictus* (111).

En Asie, la dengue (5) et le paludisme (106, 107) ont été associés à une augmentation anormale de la température et des précipitations, alors qu'en Australie les flambées d'arboviroses sont le plus souvent associées aux inondations (110). Le déve-

loppement urbain en Asie et dans les régions avoisinantes peut avoir un impact sensible sur les tendances de la transmission de la dengue. Dans certaines régions, comme au Viet Nam, les séquelles de la guerre et la lenteur de la croissance économique peuvent également jouer un rôle.

Conclusion

Les modifications et la variabilité du climat, s'ajoutant aux facteurs actuels favorables aux maladies à transmission vectorielle, comme les variations météorologiques saisonnières, la situation socio-économique, les programmes de lutte antivectorielle, les modifications de l'environnement et la résistance aux médicaments, sont susceptibles d'influencer l'épidémiologie de ces maladies. Les effets de cette situation s'exprimeront probablement de diverses façons, allant de brèves épidémies à des modifications progressives à long terme des tendances de la morbidité. Ces observations s'appuient sur des faits épidémiologiques. Par exemple, les résultats d'études récentes au Kenya laissent à penser que les anomalies de la variabilité climatique sont à l'origine de 26 % des anomalies du nombre de cas hospitalisés de paludisme des hauts plateaux (A. K. Githeko, données non publiées, 2000). Cependant, la contribution de l'ensemble des facteurs affectant la transmission des maladies et leur évolution clinique doit être prise en compte (analyse multivariée). On ne dispose actuellement que de rares données publiées à ce sujet, car le domaine des relations entre climat et santé n'est pas encore bien étudié. La part des modifications des maladies à transmission vectorielle qui peut être

attribuée aux changements climatiques est par conséquent inconnue, ce qui constitue un obstacle majeur à toute modification des politiques sanitaires basées sur des faits. Alors que l'impact de la variabilité climatique sur les maladies à transmission vectorielle est relativement facile à déceler, il n'en est pas de même des modifications à long terme du climat, beaucoup plus lentes. De plus, il est possible que les populations humaines s'adaptent à ces modifications pour en réduire l'impact. Par exemple, sur les hauts plateaux africains, le paludisme pourrait progressivement se stabiliser, ce qui conduirait à une diminution des épidémies.

L'adaptation aux modifications et à la variabilité du climat dépend dans une certaine mesure du niveau de l'infrastructure sanitaire des régions touchées. De plus, le coût et l'efficacité de la prévention et du traitement seront des déterminants critiques de la prise en charge de la maladie. Certaines régions, par exemple en Afrique et en Amérique du Sud, possèdent une grande diversité de vecteurs de maladies qui sont sensibles aux modifications du climat, et il faudra davantage d'efforts et de ressources pour faire face aux modifications prévues de l'épidémiologie de la maladie. Enfin, la variabilité climatique, contrairement à tout autre facteur épidémiologique, risque de précipiter simultanément des épidémies de maladies multiples et d'autres types de catastrophes naturelles. Les changements climatiques ont des conséquences étendues qui peuvent aller bien au-delà de la santé et concerner tous les systèmes contribuant au maintien de la vie. Il s'agit par conséquent d'un facteur qui doit être considéré comme crucial parmi ceux qui affectent la santé et la survie humaines. ■

Bibliographie

1. **Houghton JT et al.**, eds. *An introduction to simple climate models used in the IPCC Second Assessment Report*. Genève, Groupe intergouvernemental d'Experts sur l'Evolution du Climat (GIEC), 1997 (document technique non publié).
2. **Watson RT et al.**, eds. *The regional impacts of climate change. An assessment of vulnerability. A Special Report of IPCC Working Group II*. Cambridge, Cambridge University Press, 1998.
3. **Watson RT et al.**, eds. *Climate change 1995; impacts, adaptations and mitigation of climate change: scientific-technical analysis. Contribution of Working Group II to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, Cambridge University Press, 1996.
4. **Lindsay SW, Birley MH**. Climate change and malaria transmission. *Annals of Tropical Medicine and Parasitology*, 1996, **90**: 573-588.
5. **Watts DM et al.** Effect of temperature on the vector efficiency of *Aedes aegypti* for dengue 2 virus. *American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*, 1987, **36**: 143-152.
6. **Rueda LM et al.** Temperature-dependent development and survival rates of *Culex quinquefasciatus* and *Aedes aegypti* (Diptera: Culicidae). *Journal of Medical Entomology*, 1990, **27**: 892-898.
7. **Gillies MT**. The duration of the gonotrophic cycle in *Anopheles gambiae* and *An. funestus* with a note on the efficiency of hand catching. *East African Medical Journal*, 1953, **30**: 129-135.
8. **Turell MJ**. Effects of environmental temperature on the vector competence of *Aedes fowleri* for Rift Valley fever virus. *Research in Virology*, 1989, **140**: 147-154.
9. **Carter TR, Hulme M**. *Interim characterizations of regional climate and related changes up to 2100 associated with the provisional SRES emissions scenarios: guidance for lead authors of the IPCC Working Group II Third Assessment Report*. Washington, DC, IPCC Working Group II Technical Support Unit, 1999 (document non publié).
10. El Niño et ses répercussions sur la santé. *Relevé épidémiologique hebdomadaire*, 1998, **73** (20): 148-152.
11. **Linthicum JK et al.** Climate and satellite indicators to forecast Rift Valley fever epidemic in Kenya. *Science*, 1999, **285**: 297-400.
12. **Lindsay SW et al.** Effect of 1997-8 El Niño on highland malaria in Tanzania. *Lancet*, 2000, **355**: 989-990.
13. **Faye O et al.** La sécheresse et la baisse du paludisme dans les Niayes du Sénégal. *Cahiers Santé*, 1995, **5** (5): 299-305.
14. **Coluzzi M et al.** Chromosomal differentiation and adaptation to human environment. *Transactions of the Royal Society of Medicine and Hygiene*, 1979, **73**: 483-497.
15. **Lindsay SW, Parson L, Thomas J**. Mapping the ranges and relative abundance of the two principal African malaria vectors, *Anopheles gambiae* sensu stricto and *An. arabiensis*, using climate data. *Proceedings of the Royal Society of London, B*, 1998, **265**: 847-854.
16. **Ernould JC, Ba K, Sellin B**. The impact of the local water-development programme on the abundance of the intermediate

- hosts of schistosomiasis in three villages of the Senegal River delta. *Annals of Tropical Medicine and Parasitology*, 1999, **93** : 135-145.
17. **Marti HP et al.** Studies on the ecology of *Bulinus globosus*, the intermediate host of *Schistosoma haematobium* in the Ifakara area, Tanzania. *Acta Tropica*, 1985, **42** : 171-187.
 18. **Woolhouse ME, Chandiwana SK.** Population dynamics model for *Bulinus globosus*, intermediate host for *Schistosoma haematobium*, in river habitats. *Acta Tropica*, 1990, **47** : 151-160.
 19. **Ghebreyesus TA et al.** Incidence of malaria among children living near dams in northern Ethiopia : community based incidence survey. *British Medical Journal*, 1999, **319** : 663-666.
 20. **Ollivier G, Brutus L, Cot M.** La schistosomose intestinale à *Schistosoma mansoni* à Madagascar : extension et focalisation de l'endémie. *Bulletin de la Société de Pathologie Exotique*, 1999, **92** (2) : 99-103.
 21. **World Bank : Africa Live Database**, Internet 5/01/2000. <http://wb1n0018.worldbank.org/afr/aftrbrief.nsf>.
 22. **Phillips M, Phillips-Howard PA.** Economic implications of resistance to antimalarial drugs. *Pharmacoeconomics*, 1996, **10** : 225-238.
 23. **Ruebush TK et al.** Self-treatment of malaria in a rural area of western Kenya [Autotraitement du paludisme dans une région rurale de l'ouest du Kenya]. *Bulletin de l'Organisation mondiale de la Santé*, 1995, **73** (2) : 229-236 (résumé en français).
 24. **Hamilton AC.** The climate of East Usambaras. In : Hamilton AC, Bensted-Smith R, eds. *Forest conservation in the East Usambaras*. Gland (Suisse), Union internationale pour la Conservation de la Nature, 1989 : 79-102.
 25. **Lindsay SW, Martens WJM.** Malaria in the African highlands : past, present and future [Le paludisme sur les hauts plateaux africains : situation passée, actuelle et future]. *Bulletin de l'Organisation mondiale de la Santé*, 1998, **76** (1) : 33-45 (résumé en français).
 26. **Connor SJ, Thomson MC, Molyneux DH.** Forecasting and preventing epidemic malaria : new perspectives and old problems. *Parasitologia*, 1999, **41** : 439-448.
 27. La situation du paludisme dans le monde en 1994. *Relevé épidémiologique hebdomadaire*, 1997, **72** (36) : 269-274.
 28. **Loevinsohn ME.** Climate warming and increase in malaria incidence in Rwanda. *Lancet*, 1994, **343** : 714-718.
 29. **Matola YG, White GB, Magayuka SA.** The changed pattern of malaria endemicity and transmission at Amani in the eastern Usambara mountains, north-eastern Tanzania. *Journal of Tropical Medicine and Hygiene*, 1987, **90** : 127-134.
 30. **Hackett L.** *Malaria in Europe : an ecological approach*. Londres, Oxford University Press, 1937.
 31. **Bruce-Chwatt L, Zulueta JD.** *The rise and fall of malaria in Europe*. Londres, Oxford University Press, 1980.
 32. **Molineaux L.** *The epidemiology of human malaria as an explanation of its distribution, including some implications for its control*. New York, Churchill Livingstone, 1988.
 33. **Sabatinelli G.** Contextual determinants of malaria in the WHO European Region. Communication présentée à : *Contextual Determinants of Malaria : an International Workshop, Lausanne, Switzerland, 14-18 May 2000*. Pittsburg, PA, Center for Integrated Study of the Human Dimensions of Global Change, Carnegie Mellon University, USA, 2000 (document non publié).
 34. **Baldari M et al.** Malaria in Maremma, Italy. *Lancet*, 1988, **351** : 1246-1247.
 35. **Simini B.** First case of indigenous malaria reported in Italy for 40 years. *Lancet*, 1997, **350** : 717.
 36. **Boyd MF.** *Malariaology. A comprehensive survey of all aspects of this group of diseases from a global standpoint*. Philadelphie, PA, WB Saunders, 1949.
 37. **James S.** Some general results of a study of induced malaria in England. *Transactions of the Royal Society of Tropical Medicine and Hygiene*, 1931, **24** : 477-525.
 38. **Shute PG.** Failure to infect English specimens of *Anopheles maculipennis* var. *atroparvus* with certain strains of *Plasmodium falciparum* of tropical origin. *Journal of Tropical Medicine and Hygiene*, 1940, **43** : 175-178.
 39. **Ribeiro H et al.** An attempt to infect *Anopheles atroparvus* from Portugal with African *Plasmodium falciparum*. *Revista Portuguesa de Doenças infecciosas*, 1989, **12** : 81-82.
 40. **Shute PG.** Malaria in England. *Public Health*, 1945, **58** : 62-65.
 41. **Ramsdale CD, Coluzzi M.** Studies on the infectivity of tropical African strains of *Plasmodium falciparum* to some southern European vectors of malaria. *Parasitologia*, 1975, **17** : 39-48.
 42. **Martens P.** *Health and climate change*. Londres, Earthscan, 1998.
 43. **Danis M et al.** Paludisme autochtone et introduit en Europe. *Médecine et maladies infectieuses*, 1999, **26** : 393-396.
 44. **Romi R, Di Luca M, Majori G.** Current status of *Aedes albopictus* and *Aedes atropalpus* in Italy. *Journal of the American Mosquito Control Association*, 1999, **15** : 425-427.
 45. **Lundström J.** Mosquito-borne viruses in Western Europe : a review. *Journal of Vector Ecology*, 1999, **24** : 1-39.
 46. **Sutherst R.** Implications of global change and climate variability for vector-borne diseases : generic approaches to impact assessments. *International Journal for Parasitology*, 1998, **28** : 935-945.
 47. **Lindgren E.** Climate and tickborne encephalitis. *Conservation Ecology*, 1998, **2** : 1-14.
 48. **Jaenson T et al.** Geographical distribution, host associations and vector roles of ticks (Acari : Ixodidae, Argasidae) in Sweden. *Journal of Medical Entomology*, 1994, **31** : 240-256.
 49. **Lindgren E, Talleklint L, Polfeldt T.** Impact of climatic change on the northern latitude limit and population density of the disease-transmitting European tick *Ixodes ricinus*. *Environmental Health Perspectives*, 2000, **108** : 119-123.
 50. **Dedet J, Pratloug F.** Leishmania, Trypanosoma and moxoneous trypanosomatids as emerging opportunistic agents. *Journal of Eukaryotic Microbiology*, 2000, **47** : 37-39.
 51. *Health in the Americas*, vol. I. Washington, DC, Organisation panaméricaine de la Santé, 1998 (Scientific Publication, No. 569).
 52. *Health conditions in the Americas*, vol. I. Washington, DC, Organisation panaméricaine de la Santé, 1994 (Scientific Publication, No. 549).
 53. **Vasconcelos, PFC et al.** Clinical and ecoepidemiological situation of human arboviruses in Brazilian Amazonia. *Journal of the Brazilian Association for the Advancement of Science*, 1992, **44** : 117-124.
 54. **Bouma MJ et al.** Predicting high-risk years for malaria in Colombia using parameters of El Niño-Southern Oscillation. *Tropical Medicine and International Health*, 1997, **2** : 1122-1127.
 55. **Poveda, G et al.** Climate and ENSO variability associated with vector-borne diseases in Colombia. In : Diaz HF, Markgraf V, eds. *El Niño and the Southern Oscillation, multiscale variability and regional impact*. Cambridge, Cambridge University Press, 1999.
 56. **Bouma MJ, Dye C.** Cycles of malaria associated with El Niño in Venezuela. *Journal of the American Medical Association*, 1997, **278** : 1772-1774.
 57. **Telleria AV.** Health consequences of the floods in Bolivia in 1982. *Disasters*, 1986, **10** : 88-106.
 58. **Cedeño JEM.** Rainfall and flooding in the Guayas river basin and its effects on the incidence of malaria 1982-1985. *Disasters*, 1986, **10** : 107-111.
 59. **Russac PA.** Epidemiological surveillance : malaria epidemic following el Niño phenomenon. *Disasters*, 1986, **10** : 112-117.
 60. **Burgos JJ et al.** Malaria and global climate change in Argentina. *Entomology of Vectors*, 1994, **1** : 123.
 61. **Curto de Casas SI, Carcavallo RU.** Climate change and vector-borne diseases distribution. *Social Science and Medicine*, 1995, **40** : 1437-1440.
 62. **Carcavallo RU, Curto de Casas, SI.** Some health implications of global warming in South America. *Journal of Epidemiology*, 1996, **6** : 5153-5157.
 63. **Martens P et al.** Climate change and future populations at risk of malaria. *Global Environmental Change*, 1999, **9** : S89-S107.
 64. **Yates DN.** Climate change impacts on the hydrologic resources of South America : an annual, continental scale assessment. *Climate Research*, 1997, **9** : 147-155.
 65. **Patz JA et al.** Predicting key malaria transmission factors, biting and entomological inoculation rates using modeled soil moisture

- in Kenya. *Journal of Tropical Medicine and International Health*, 1998, **3** : 818-827.
66. **Costa CH**. Urbanization and kala-azar in Brazil : kala-azar in Teresina. In : Brandão Filho, SP, ed. *Research and control of leishmaniasis in Brazil. Proceedings of a Workshop*. Recife, Cpag, Fiocruz, 1993.
67. **Silva AR et al**. [Leishmaniose viscérale (kala-azar) sur l'île de São Luís, Maranhão, Brésil : évolution et perspectives]. *Revista de la Sociedade Brasileira de Medicina Tropical*, 1997, **30** : 359-368 (en portugais).
68. **Lean J, Warrilow DA**. Simulation of the regional climatic impact of Amazon deforestation. *Nature*, 1989, **342** : 411-413.
69. **Nobre CA, Sellers PJ, Shukla J**. Amazon deforestation and regional climate change. *Journal of Climate*, 1991, **4** : 957-988.
70. **Shukla J, Nobre C, Sellers P**. Amazon deforestation and climate change. *Science*, 1990, **247** : 1322-1325.
71. **Chivian E**. Global environmental degradation and biodiversity loss : implications for human health. In : Grifo F, Rosenthal J, eds. *Biodiversity and human health*. Washington, DC, Island Press, 1998 : 7-38.
72. **Foo LC et al**. Rainfall, abundance of *Aedes aegypti* and dengue infection in Selanjor, Malaysia. *Southeast Asian Journal of Tropical Medicine and Public Health*, 1985, **16** : 560-568.
73. **Jetten TH, Focks DA**. Potential changes in the distribution of dengue transmission under climate warming. *American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*, 1997, **57** : 285-297.
74. **Karl TR, Knight RW, Plummer N**. Trends in high-frequency climate variability in the twentieth century. *Nature*, 1995, **377** : 217-220.
75. **Groisman PY, Easterling DR**. Variability and trends of precipitation and snowfall over the United States and Canada. *Journal of Climate*, 1994, **7** : 186-205.
76. **Karl TR et al**. Indices of climate change for the United States. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1996, **77** : 279-303.
77. **Shriner DS et al**. *North America. The regional impacts of climate change*. Cambridge, Cambridge University Press, 1998.
78. **Gill J, Stark LM, Clark GC**. Dengue surveillance in Florida, 1997-98. *Emerging Infectious Diseases*, 2000, **6** : 30-35.
79. **Lancioti RS et al**. Origin of the West Nile virus responsible for an outbreak of encephalitis in the northeastern United States. *Science*, 1999, **286** : 2333-2337.
80. **Mount GA et al**. New version of LSTSIM for computer simulation of *Amblyomma americanum* (Acari : Ixodidae) population dynamics. *Journal of Medical Entomology*, 1993, **30** : 843-857.
81. **Glass GE**. Predicting *Ixodes scapularis* abundance on white-tailed deer using geographic information systems. *American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*, 1994, **51** : 538-544.
82. **Haile DG**. *Computer simulation of the effects of changes in weather patterns on vector-borne disease transmission*. Washington, DC, US Environmental Protection Agency, 1989.
83. **Layton M et al**. Mosquito transmitted malaria in New York, 1993. *Lancet*, 1995, **346** : 729-731.
84. **Zucker JR**. Changing patterns of autochthonous malaria transmission in the United States : a review of recent outbreaks. *Emerging Infectious Diseases*, 1996, **2** : 37-43.
85. **Gubler DJ, Trent DW**. Emergence of epidemic dengue/dengue hemorrhagic fever as a public health problem in the Americas. *Infectious Agents Diseases*, 1994, **2** : 383-393.
86. *Dengue and dengue hemorrhagic fever in the Americas : guidelines for prevention and control*. Washington, DC, Organisation panaméricaine de la Santé, 1994.
87. **Trent DW**. Genetic variation among dengue 2 viruses of different geographic origin. *Virology*, 1983, **128** : 271-284.
88. **Chandler AC**. Factors influencing the uneven distribution of *Aedes aegypti* in Texas cities. *American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*, 1945, **25** : 145-149.
89. **Shope RE**. Global climate change and infectious diseases. *Environmental Health Perspectives*, 1991, **96** : 171-174.
90. **Patz JA et al**. Dengue fever epidemic potential as projected by general circulation models of global climate change. *Environmental Health Perspectives*, 1998, **106** : 147-153.
91. **Shope RE**. Arbovirus-related encephalitis. *Yale Journal of Biology and Medicine*, 1980, **53** : 93-99.
92. **Hardy JL**. Susceptibility and resistance of vector mosquitoes. In : Monath TP, ed. *The arboviruses : epidemiology and ecology*. Boca Raton, CRC Press, 1988.
93. **Reisen WK**. Effect of temperature on the transmission of Western Equine encephalomyelitis and St. Louis encephalitis viruses by *Culex tarsalis* (Diptera : Culicidae). *Journal of Medical Entomology*, 1993, **30** : 151-160.
94. **Reeves WC**. Potential effect of global warming on mosquito-borne arboviruses. *Journal of Medical Entomology*, 1994, **31** : 323-332.
95. **Monath TP, Tsai TF**. St Louis encephalitis : lessons from the last decade. *American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*, 1987, **37** : 40-59.
96. **Bowen SG, Francy DB**. Surveillance. In : Monath TP, ed. *St. Louis Encephalitis*. Washington, DC, American Public Health Association, 1980.
97. **Schneider SH**. *Global warming : are we entering the greenhouse century ?* New York, Vintage Books, 1990.
98. **Houghton JT et al**, eds. *Climate change, 1995 — the science of climate change : contribution of working group I to the Second Assessment Report of the Inter-governmental Panel on Climate Change*. Cambridge, Cambridge University Press, 1996.
99. **Freier JE**. Eastern equine encephalomyelitis. *Lancet*, 1993, **342** : 1281-1282.
100. **Wenzel RP**. A new hantavirus infection in North America. *New England Journal of Medicine*, 1994, **330** : 1004-1005.
101. **Engelthaler DM et al**. Climatic and environmental patterns associated with hantavirus pulmonary syndrome, Four Corners region, United States. *Emerging Infectious Diseases*, 1999, **5** : 87-94.
102. **Glass GE et al**. Using remotely sensed data to identify areas at risk for hantavirus pulmonary syndrome. *Emerging Infectious Diseases*, 2000, **6** : 238-247.
103. **Parmenter RR, Prattrap YE, Parmenter CA**. Incidence of plague associated with increased winter-spring precipitation in New Mexico. *American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*, 1999, **61** : 814-821.
104. **Trejejo RT et al**. Epidemic leptospirosis associated with pulmonary hemorrhage – Nicaragua, 1995. *Journal of Infectious Diseases*, 1998, **178** : 1457-1463.
105. **Demers RY et al**. Exposure to *Leptospira icterohaemorrhagiae* in inner-city and suburban children : a serologic comparison. *Journal of Family Practice*, 1983, **17** : 1007-1011.
106. **Bouma MJ, Dye C, van der Kaay HJ**. Falciparum malaria and climate change in the northwest frontier province of Pakistan. *American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*, 1996, **55** : 131-137.
107. *El Niño et ses répercussions sur la santé*. Genève, Organisation mondiale de la Santé, 2000 (Aide-mémoire N° 192, révisé en mars 2000). www.who.int/home/info.
108. La dengue dans la Région OMS du Pacifique occidental, 1998. *Relevé épidémiologique hebdomadaire*, 1998, **73** (36) : 273-277.
109. **Hales S et al**. El Nino and the dynamics of vector-borne disease transmission. *Environmental Health Perspectives*, 1999, **107** : 99-102.
110. **Russell RC**. Mosquito-borne arboviruses in Australia : the current scene and implications of climate change for human health. *International Journal of Parasitology*, 1998, **28** : 955-969.
111. **Maguire T**. Do Ross River and dengue viruses pose a threat to New Zealand ? *New Zealand Medical Journal*, 1994, **107** : 448-450.