

Sur la base de ces études, une enzyme de ce type, nommée PEGPH20, est désormais en essai clinique pour le cancer du pancréas. Notre équipe et d'autres ont également obtenu des succès en laboratoire avec certains autres médicaments connus pour agir partiellement sur la matrice.

Plusieurs effets à évaluer

Pour parfaire le traitement par réduction de la matrice, les chercheurs doivent trouver des façons de mesurer la réaction de la matrice aux différents agents testés. Les substances qui perturbent la matrice des tumeurs réduisent-elles réellement la compression mécanique ? Lesquelles sont les plus efficaces ? Le

degré de réduction se traduit-il par une différence d'efficacité des médicaments anticancéreux plus classiques administrés de façon concomitante ?

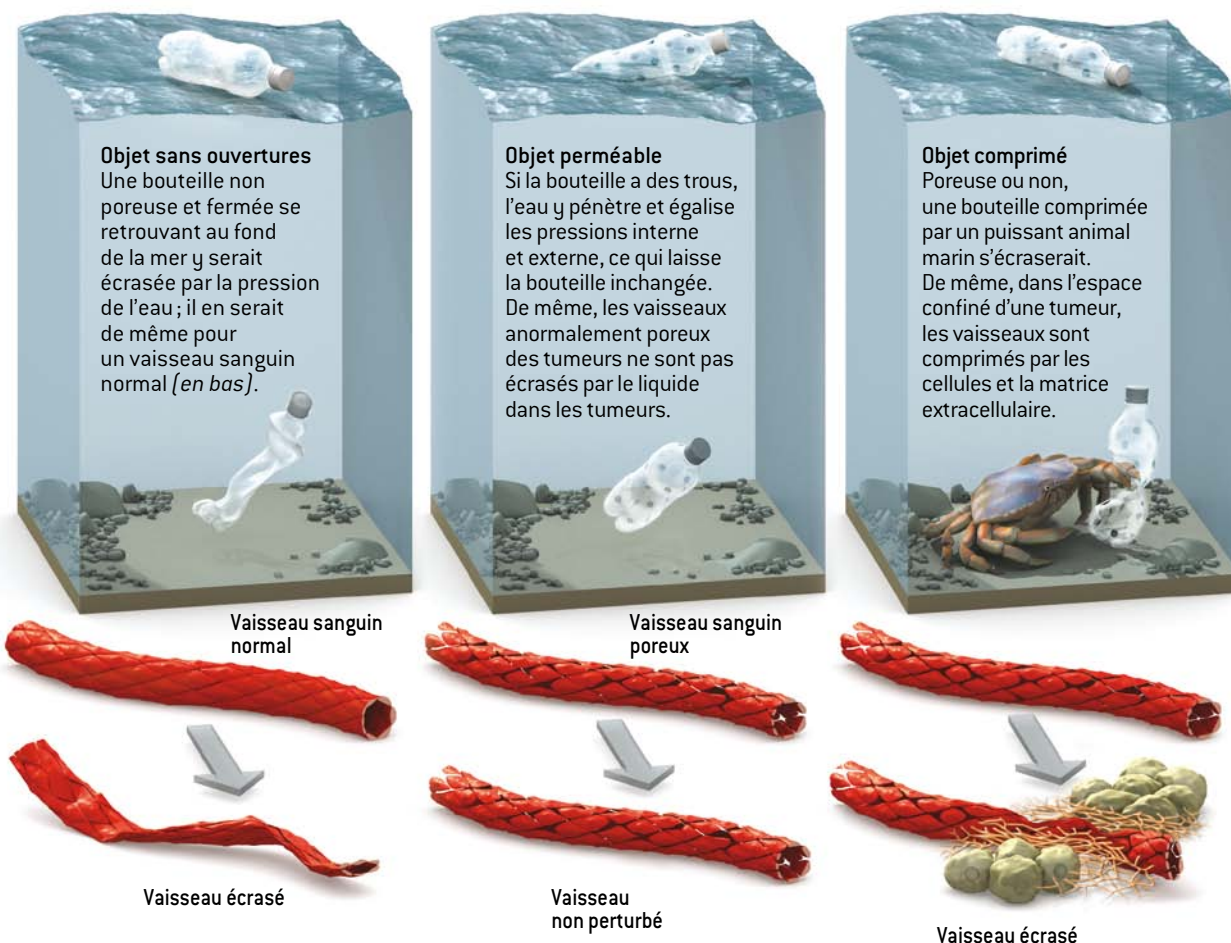
Des progrès ont été obtenus également sur ce plan. Une nouvelle méthode d'imagerie, dite par génération de second harmonique, devrait aider les chercheurs à visualiser et à quantifier le collagène des tumeurs. De plus, nous avons trouvé une façon relativement simple d'évaluer la contrainte compressive dans une tumeur : lorsque la tumeur d'un animal de laboratoire est coupée en deux, les deux moitiés enflent spontanément. La mesure du gonflement et l'application de formules mathématiques que nous avons développées permettent de quantifier la contrainte qui régnait au sein de la tumeur.

On me demande parfois si la réduction de la matrice n'aiderait pas les cellules cancéreuses à métastaser, c'est-à-dire à traverser la matrice et à atteindre des vaisseaux sanguins ou lymphatiques, puis à se propager dans d'autres parties du corps. De même, certains se demandent si le fait de dégrader la matrice ou de dilater les vaisseaux sanguins et d'augmenter ainsi le flux sanguin dans la tumeur ne faciliterait pas la fuite de cellules tumorales dans le sang ou la croissance de la tumeur en fournissant davantage de nutriments aux cellules cancéreuses, ou les deux à la fois.

Ces inquiétudes nécessitent des études complémentaires, mais plusieurs observations suggèrent que la croissance des tumeurs et les métastases ne seraient pas favorisées. Pourquoi ? D'un côté, il est vrai

POURQUOI SEULS LES SOLIDES COMPRIMENT LES VAISSEAUX SANGUINS

Beaucoup sont surpris d'apprendre que seule la matrice extracellulaire et les cellules des tumeurs compriment et bloquent les vaisseaux sanguins ; l'augmentation de la quantité de liquide n'intervient pas dans cet effet. Pour expliquer ce qui se passe, on peut faire l'analogie, chère à l'auteur, avec une bouteille en plastique tombée à la mer.



Emily Cooper - source : Lance L. Munn, Laboratoire de biologie tumorale, Faculté de médecine de Harvard et Hôpital général du Massachusetts

que des nutriments parviendraient aux cellules tumorales, qui seraient également plus libres de migrer. Mais d'un autre côté, on réduirait la privation d'oxygène, qui favorise le développement de la tumeur et diminue la capacité de la réponse immunitaire ainsi que l'efficacité de nombreux traitements. En outre, des quantités plus importantes de médicaments et un nombre potentiellement plus élevé de cellules immunitaires se déploieraient dans la tumeur. Des études en cours chez l'animal et l'humain montreront lesquels de ces effets dominant.

Quand nous avons commencé à envisager de combattre le cancer avec des antagonistes des récepteurs de l'angiotensine, plusieurs chercheurs consultés nous ont dissuadés de suivre cette voie. Comme les agents bloquants diminuent la pression artérielle, ils entraîneraient normalement une diminution de la circulation sanguine et non une augmentation. De plus, des études portant sur l'administration d'angiotensine (qui, contrairement à son blocage, augmente la pression artérielle)

ont révélé une augmentation de la circulation sanguine dans les tumeurs dans de nombreuses études menées chez la souris et l'être humain.

Contre-attaque physique

Toutefois, ces travaux n'ont pas pris en compte les effets de compression de la matrice et un essai visant à évaluer l'efficacité du traitement du cancer par l'angiotensine chez des patients a échoué. Quelques années plus tard, nous avons expliqué l'échec: le médicament n'augmentait que transitoirement la circulation sanguine, vraisemblablement parce que la contrainte compressive a rapidement bloqué les vaisseaux touchés.

En cancérologie, il ne s'agit plus seulement de mieux comprendre les fondements génétiques et cellulaires du cancer. Il faut aussi prendre en compte les forces mécaniques, que les tumeurs solides exploitent pour survivre. Nous pouvons nous servir de nos propres connaissances en physique pour contre-attaquer. ■

■ BIBLIOGRAPHIE

R. K. Jain, **Normalizing tumor microenvironment to treat cancer: Bench to bedside to biomarkers**, *Journal of Clinical Oncology*, vol. 31(31), pp. 2205-2218, 2013.

V. P. Chauhan *et al.*, **Angiotensin inhibition enhances drug delivery and potentiates chemotherapy by decompressing tumor blood vessels**, *Nature Communications*, vol. 4, article 2516, 2013.

T. Stylianopoulos *et al.*, **Causes, consequences and remedies for growth-induced solid stress in murine and human tumors**, *PNAS*, vol. 109(38), pp. 15101-15108, 2012.

Toutes les ARCHIVES

■ Pour la Science

■ Dossier
Pour la Science

depuis

1996



maintenant disponibles sur www.pourlascience.fr*

* Numéros à lire en ligne ou téléchargeables en PDF, en vente à l'unité ou accessibles par abonnement.



**PRESSES POLYTECHNIQUES
ET UNIVERSITAIRES ROMANDES**

Editeur scientifique de référence depuis 1980

PARUTIONS PRINTEMPS 2014



LA FACE CACHÉE DE LA LUNE : LA SCIENCE ET LES COÏNCIDENCES

François Rothen

Le nouvel ouvrage du physicien François Rothen dresse l'inventaire, dans un texte simple et accessible à tous, des surprenantes coïncidences, des hasards extraordinaires et des analogies parfois trompeuses qui ont marqué la recherche scientifique. Où l'on y démystifie une fois pour toute l'astrologie, la numérologie et les autres pseudosciences.

288 pages, ISBN 9782889150410

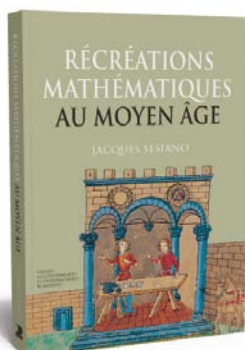
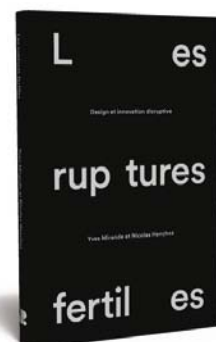
LES RUPTURES FERTILES

Design et innovation disruptive

Nicolas Henchoz, Yves Mirande

Le design joue un rôle essentiel dans l'appropriation par la société de toute technologie de rupture. Sa pratique peut transformer une performance technologique en innovation et, par conséquent, en usages inscrits dans le quotidien. Un livre événement, richement illustré, qui montre que le design est bien différent du « gadget » marketing que l'on croit.

220 pages, ISBN 9782889150328



RÉCRÉATIONS MATHÉMATIQUES AU MOYEN ÂGE

Jacques Sesiano

A la croisée de l'histoire et des mathématiques, ce livre s'adresse à tous ceux, spécialistes (étudiants et enseignants en mathématiques, médiévistes) comme amateurs, tentés par le dépaysement d'une immersion dans la vie quotidienne et intellectuelle du Moyen Âge.

300 pages, ISBN 9782880744984

TRACES D'ARMES À FEU

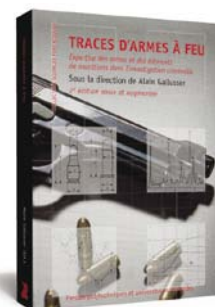
Expertise des armes et des éléments de munitions dans l'investigation criminelle

2^e éd. revue et augmentée

Alain Gallusser éd.

Un désormais « classique » de la littérature en sciences criminelles. Cette nouvelle édition a été largement revue et augmentée par les meilleurs spécialistes francophones du domaine ; le chapitre consacré à la balistique est notamment entièrement nouveau, tout comme celui dédié à l'identification des armes par les traces laissées sur les éléments de munition lors du tir.

496 pages, ISBN 9782880748876



NOUVEAUTÉS
ET OUVRAGES DE RÉFÉRENCE

**www.ppur.org
www.epflpress.com**

Ouvrages disponibles en librairie

Cahier spécial

Eau Santé Environnement
Migrations Économie

L'adaptation au changement climatique

Dans ce troisième volet du *Cahier spécial : Adaptation au changement climatique*, sont abordées de nouvelles questions. Comment préserver la ressource en eau et en optimiser l'usage ? Quelles conséquences le changement climatique aura-t-il sur l'émergence et la propagation des maladies ? L'approche économique peut-elle apporter des réponses et orienter les décisions stratégiques ? Face à l'évolution de son environnement, l'homme est soumis à de nouvelles contraintes. Il étudie comment les gérer et en minimiser les effets. Les questions soulevées sont complexes, mais cette complexité ne peut servir de prétexte à l'inaction. Mieux prendre en compte des paramètres naguère négligés, améliorer toute la chaîne de production, pour qu'elle devienne plus « intelligente » : la tâche est immense, mais pas (encore) hors de portée !

ANTICIPER UNE DIMINUTION DE LA RESSOURCE EN EAU 66

F. Habets, Ph. Mérot, B. Itier, A. Thomas

VERS UNE ÉCOLOGIE DE LA SANTÉ 70

O. Plantard, L. Huber, J.-F. Guégan

COMMENT GÉRER LES FLUX MIGRATOIRES ? 76

F. Gemenne

LES ENJEUX ÉCONOMIQUES 78

P.-A. Jayet, S. De Cara, N. de Noblet-Ducoudré

DES MENACES AUX SOLUTIONS 82

J.-F. Soussana, T. Caquet, J. Mousset

En partenariat avec



Anticiper une diminution de la ressource en eau

wae/Shutterstock

Florence Habets est directrice de recherche CNRS dans l'Unité milieux environnementaux, transferts et interactions dans les hydrosystèmes et les sols de l'Université Pierre et Marie Curie.

Philippe Mérot est directeur de recherche dans l'Unité sol agro et hydrosystèmes spatialisés de l'INRA.

Bernard Itier est directeur honoraire de l'Unité environnement et grandes cultures de l'INRA.

Alban Thomas est directeur de recherche au Laboratoire d'économie des ressources naturelles de l'INRA.

La ressource en eau subira de plein fouet le changement climatique. Il sera indispensable de réduire les consommations et de mettre en place une gestion raisonnée de cette ressource fragile et limitée.

Les ressources en eau seront inévitablement modifiées par le réchauffement climatique. Ce sera donc le cas des quatre principaux usages : domestiques, agricoles, industriels et environnementaux. Quel sera l'impact sur les quantités d'eau disponibles ? Quelles seront les nouvelles règles de partage et quels moyens pourra-t-on mettre en œuvre pour s'y préparer ?

L'élévation des températures aura de multiples conséquences, souvent liées, sur cette ressource limitée. Elle modifiera, tout d'abord, la répartition géographique des pluies, car la hausse des températures sera moins forte à l'équateur qu'au niveau des pôles. Or, à l'échelle de la planète, le gradient des températures est associé à la circulation des grandes masses d'air et, par conséquent, au transport de chaleur et aux vents circulant aux latitudes moyennes. En Europe, dès 2050, les précipitations devraient avoir diminué dans les zones méridionales et augmenté dans les régions septentrionales.

De surcroît, avec l'augmentation des températures, l'atmosphère contiendra davantage de vapeur d'eau, ce qui perturbera encore le régime des

pluies. Dans les zones tempérées et humides, cela se traduira par une fréquence accrue des précipitations fortes (plus de dix millimètres par jour) – une tendance que l'on observe déjà sur l'ensemble des continents. Dans les régions sèches, en revanche, la hausse des températures entraînera une diminution de la fréquence des pluies, car le seuil de déclenchement des précipitations devrait être plus élevé qu'aujourd'hui.

Eau verte et eau bleue

Le surplus d'eau contenu dans un air plus chaud résulte d'une augmentation des échanges hydriques avec la surface, l'eau s'évaporant davantage. Cette « demande évaporative » accrue est facilement satisfaite au-dessus des océans. Elle est plus contraignante au niveau des continents, où l'évaporation provient surtout de la végétation qui puise l'eau dans les sols. On parle alors d'« eau verte », car cette eau contribue à la production de biomasse *via* le processus de photosynthèse. L'autre forme d'eau présente sur les continents est appelée « eau bleue ». On la trouve dans les lacs, les ri-

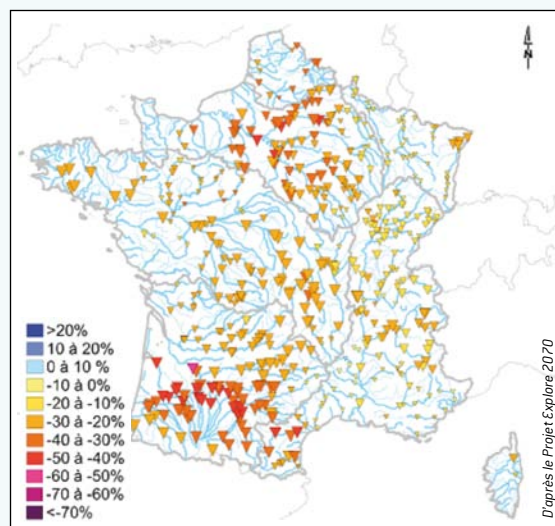
vières, les nappes souterraines et les zones humides. C'est celle qu'on utilise pour les besoins en eau potable, pour l'industrie et pour l'agriculture.

Or, qu'il s'agisse de l'eau bleue ou de l'eau verte, elles sont issues des pluies, et sont donc interdépendantes : une déperdition d'eau verte entraîne une diminution d'eau bleue. En France, on estime ainsi que le réchauffement climatique provoquera une baisse de 20 à 30 pour cent des débits annuels d'eau bleue dès 2050 (voir la carte ci-contre). Cette diminution devrait s'accompagner de sécheresses à la fois plus fréquentes et plus longues, sans pour autant diminuer le risque de crues. Au contraire, ce risque pourrait augmenter dans certaines régions, tel le Sud-Est de la France.

Les adaptations envisageables

Comment s'adapter à ces changements prévisibles ? Une première voie d'adaptation consiste à mettre en place une politique de l'offre – c'est-à-dire à compenser les futures pénuries par de nouvelles ressources. Pour ce faire, on peut développer les dispositifs de prélèvement, tels que le pompage des nappes et la déviation de rivières. On peut aussi construire de nouvelles usines de dessalement, des barrages hydrauliques et des réserves artificielles servant à stocker l'eau de pluie. De telles infrastructures pourraient se révéler nécessaires pour maintenir l'irrigation dans les secteurs agronomiques clés, ainsi que de bonnes conditions de navigation fluviale (sur le Rhin ou le Danube), mais aussi pour préserver la sécurité des centrales nucléaires, qui exigent de grandes quantités d'eau.

Cette stratégie visant à développer l'exploitation des eaux bleues et celles issues des stations de traitement des eaux « grises » – les eaux usées – (via le recyclage) implique des financements massifs. En France, sa mise en œuvre incombe aux Agences de l'eau, aux



Évolution attendue du débit moyen annuel des cours d'eau français. On a comparé les moyennes des années 1961 à 1990 et des moyennes prévues entre 2046 et 2065. On voit que les régions Sud-Ouest et Nord subiront des baisses aux alentours de 50 pour cent. La taille des triangles indique le degré de convergence des 14 simulations moyennées.

Établissements publics territoriaux de bassin ainsi qu'aux compagnies d'aménagement. L'aspect financier n'est pas la seule difficulté à laquelle ces institutions sont confrontées. Au-delà des activités de production et de consommation, l'évaluation de l'intérêt collectif de ces nouvelles infrastructures doit intégrer des considérations écologiques et environnementales. À ce titre, l'opposition suscitée depuis près de 30 ans à la construction d'un barrage à Charlas, en Midi-Pyrénées, illustre bien comment de tels projets sont susceptibles d'exacerber les conflits locaux.

Les projets d'aménagement sont en général soumis à des analyses qui mettent en balance les coûts de construction avec les bénéfices escomptés. La construction du barrage de la Renaissance sur le Nil Bleu, en Éthiopie, qui a commencé au printemps 2013, a fait l'objet d'une telle analyse coûts-bénéfices. Elle détaillait les aspects financiers (liés aux investissements ou au déplacement des populations), les risques sismiques ainsi que les bénéfices attendus en termes de production hydroélectrique et d'extension des surfaces irriguées. Ce type d'analyse constitue un outil d'aide à la décision, qui s'ajoute aux enquêtes d'utilité publique, aux rapports parlementaires et aux études de faisabilité. L'ensemble permet d'arbitrer un arbitrage sur les différents scénarios envisagés : *statu quo*, lancement du projet ou aménagements alternatifs.

Cette forme d'adaptation n'en demeure pas moins limitée. L'irrigation ne résoudra pas toutes les difficultés auxquelles sera confrontée l'agriculture. Des prélèvements excessifs dans les nappes, les lacs ou les rivières peuvent conduire à leur disparition temporaire, à l'instar de la mer d'Aral, en Asie centrale, qui a perdu 90 pour cent de son volume entre les années 1960 et le milieu des années 2000. L'assèchement des systèmes hydriques s'accompagne souvent d'un dépérissement des écosystèmes terrestres et aquatiques, ainsi que de mouvements de terrain.

Outre les risques d'assèchement, ce type d'adaptation nous rend plus dépendants de la ressource et moins résilients aux extrêmes climatiques. Ainsi, les pouvoirs publics ont progressivement réalisé que la mobilisation de nouvelles ressources devait être associée à des mesures de régulation. Elles consistent, notamment, à limiter notre dépendance à l'égard de la ressource. Un des éléments clés est la compétition entre l'eau verte et l'eau bleue, puisqu'une consommation accrue de la première entraîne une diminution de la seconde – celle qui est distribuée dans les réseaux d'alimentation.

Réduire les consommations

Les systèmes de production agricole ont déjà commencé à évoluer pour que notre consommation d'eau diminue. Une première approche vise à modifier les périodes de semis ou de récolte, afin d'adapter les cultures à l'évolution des températures saisonnières. Une autre méthode vise, par exemple, à introduire des espèces moins gourmandes en eau, telles que le soja et le sorgho.

Plus généralement, l'agroécologie et son succédané le plus récent, l'agriculture écologiquement intensive, apparaissent comme des solutions prometteuses pour adapter l'agriculture aux changements globaux et répondre à une demande croissante en produits

de qualité. Ces approches systémiques s'appliquent à augmenter les productions tout en respectant la santé humaine et l'équilibre des écosystèmes. Elles s'appuient sur des fonctionnalités écologiques naturelles, telle la biodiversité au sein des cultures afin de limiter la prolifération des ravageurs. Un autre exemple d'agriculture écologiquement intensive consiste à effectuer des semis sur des sols non la-

bourés présentant un couvert végétal permanent. Grâce à un système racinaire profond et puissant, ce couvert végétal fait remonter des nutriments vers la surface où ils sont utilisés par les cultures principales. Le ruissellement des eaux de pluie se trouve par ailleurs diminué. Une biomasse importante peut ainsi être produite avec de moindres quantités d'eau, pendant les saisons sèches notamment.

Ces nouvelles pratiques peuvent néanmoins conduire à une compétition accrue pour la ressource en eau – comme dans l'agroforesterie, par exemple, où des plantations d'arbres sont associées à l'exploitation des terres agricoles. Pour les optimiser, il faut intégrer une série d'approches : agronomique, économique, hydrologique, sanitaire et environnementale. L'intégration est réalisée à l'aide de simulations numériques, qui permettent d'élaborer des scénarios d'évolution proposant une palette d'adaptations biotechniques. En plus de cette approche virtuelle, l'adaptation passe par l'implication des acteurs de terrain dans des dispositifs expérimentaux imaginés avec des agriculteurs, pour faire en sorte qu'ils s'approprient au mieux les évolutions en cours.

Pour favoriser une adaptation limitant notre dépendance à la ressource, diverses actions pourront être déployées, et certaines le sont déjà en Europe. Elles concernent le secteur résidentiel et les régions semi-arides en particulier. Ces actions comprennent des tarifications adaptées à la raréfaction de la ressource, des restrictions réglementaires, ainsi que des politiques de sensibilisation et d'aide aux investissements dans des équipements plus économes en eau.

Des études ont montré que la sensibilité des usagers à l'égard du prix de la ressource est souvent assez faible, mais que cette sensibilité augmente rapidement avec les coûts d'accès – et ce d'autant plus que leur niveau est couplé à des mesures de restriction. La clarté des informations fournies dans les factures d'eau se révèle par ailleurs particulièrement importante pour transmettre un message fort sur la rareté de la ressource. On constate aussi que l'anticipation des coûts d'accès croissants à l'égard d'une ressource qui se raréfie incite souvent les usagers à se munir d'équipements sanitaires et électroménagers plus économes en eau.

De même, les agriculteurs qui pratiquent l'irrigation devraient pouvoir



Construit sur la rivière Naryn, affluent du Syr-Daria, près de la frontière ouzbek, le barrage de Taktogul est le plus grand du Kirghistan.

Une source de coopération plus que de conflits

La géopolitique de l'eau est souvent présentée comme une compétition entre pays pour une ressource considérée comme stratégique et source de conflits. Cette concurrence concerne des pays situés le long d'un cours d'eau ou partageant des ressources souterraines. Mais, au cours des 50 dernières années, grâce aux relations interétatiques, des solutions de coopération ont été trouvées dans la majorité des cas.

Ainsi, Ariel Dinar, de l'Université de Californie à Riverside, et Pradeep Kurukulasuriya, un des experts du Programme des Nations unies pour le développement, ont montré que la rareté structurelle de la ressource joue un rôle positif sur la coopération entre États. D'autres facteurs, tels que la bonne gouvernance et les échanges internationaux, pèsent souvent davantage que les caractéristiques géographiques. Par ailleurs, on constate que les accords de coopération incluent souvent d'autres aspects, notamment la production d'hydroélectricité, la protection contre les crues et le contrôle de la pollution.

L'accord sur le fleuve Sir-Daria concerne par exemple trois pays d'Asie centrale : en amont, le Kirghizistan ; et en aval, l'Ouzbékistan et le Kazakhstan. Dans le cadre d'un accord hérité du modèle soviétique, le pays en amont s'engage à fournir de l'électricité et de l'eau d'irrigation en échange du pétrole fourni par les pays en aval.

Il existe plus de 200 cours d'eau transfrontaliers dans le monde, dont certains font l'objet d'accords internationaux dans des contextes de raréfaction de la ressource. Leur stabilité pourrait être remise en cause par le changement climatique. Ainsi, en 2008, des économistes ont constaté que les accords de partage étaient d'autant plus solides que les débits moyens des cours d'eau étaient importants, et, inversement, que des débits fluctuant tendaient à exacerber les tensions. Il est donc essentiel de déterminer des règles de partage considérées comme équitables par les différents pays concernés, ainsi que des mécanismes de compensations adaptés aux évolutions économiques et climatiques.

anticiper les scénarios climatiques, afin d'opter pour les systèmes de production les mieux adaptés. Et ce d'autant que, depuis 2006, les aides compensatoires européennes ont été uniformisées : elles ne favorisent plus les cultures irriguées à forts rendements, tel le maïs. Des cultures de substitution pourront donc plus facilement être développées. Toutefois, elles devront s'appuyer sur des filières territoriales ou d'exportation viables. Le maïs pourrait ainsi être remplacé par le sorgho pour l'alimentation animale, mais la filière française demeure encore mal structurée dans ce secteur.

Événements extrêmes

Quelle que soit la stratégie d'adaptation choisie, il nous faudra aussi nous adapter aux événements climatiques extrêmes, dont la fréquence et l'intensité augmenteront. Il existe deux grandes stratégies : éviter ou accepter. Pour faire face aux risques de crue, par exemple, les stratégies d'évitement consistent à fabriquer des bassins de rétention en amont des cours d'eau ; dans les zones urbaines, on pourrait utiliser des matériaux poreux (graviers ou bitumes drainant) pour les trottoirs et les chaussées, valoriser la récupération des eaux de pluie, créer des zones d'expansion de crue (ce qui permet d'éviter les crues en aval, mais nécessite la submersion de terres agricoles en amont).

L'adaptation aux sécheresses passe par la réduction de la dépendance, mais aussi par la création de ressources de sécurité (barrages), ou des méthodes de recharge artificielle des nappes, l'eau ainsi stockée pouvant être utilisée en période critique (une telle possibilité est à l'étude pour le bassin de la Seine).

Quant aux stratégies d'acceptation, elles visent à adapter le milieu urbain aux inondations de certains quartiers, ce qui se traduirait par des constructions sur pilotis (par exemple au Bangladesh) ou des habitations « flottantes » (comme aux Pays-Bas),



Bateau échoué près de Moynaq, un ancien port situé au Sud de la mer d'Aral, en Asie centrale. Ce lac d'eau salée s'est en partie asséché, car les fleuves qui l'alimentaient ont été utilisés pour l'irrigation.

et à inciter les agriculteurs à renoncer à certaines parcelles pour favoriser les plus résilientes. Il faudra prévoir des types adaptés d'assurances dédiées aux agriculteurs, qui remplaceront progressivement les fonds de compensation. Des dispositifs publics de réassurance seront nécessaires étant donné les montants en jeu.

Précisons que l'adaptation aux sécheresses passe souvent par des restrictions d'usage. Ces dernières doivent être appliquées de façon uniforme sur une même zone géographique ou administrative, mais différenciées selon les usages – les usages résidentiels demeurant la priorité. Enfin, évoquons un dernier mécanisme d'adaptation : la gestion concertée de l'eau au niveau local, le plus souvent par des collectifs d'agriculteurs. Fondés sur des règles de partage de la ressource décidées collectivement, ces systèmes sont souvent mieux acceptés que les mesures tarifaires, mais ne résisteraient pas si l'eau venait à manquer.

Ces efforts de concertation ne se réduisent pas aux situations extrêmes. Une adaptation durable ne pourra se construire, en effet, qu'à la faveur

d'une vision territoriale des ressources et des besoins en eau. Cette approche a l'agrément de l'ensemble des acteurs et vaut pour les différents problèmes : approvisionnement en eau potable, agriculture, industrie, contraintes énergétiques et préservation des écosystèmes.

Le bassin-versant – une région où toutes les eaux convergent vers un même exutoire – est l'unité territoriale la mieux adaptée à cette réflexion collective. Dans ce cadre, il s'agit de privilégier l'usage des sols qui présentent les meilleures capacités d'adaptation et de résilience. Cette approche conduira au développement d'outils de gestion capables d'intégrer les considérations agronomiques et hydrologiques à différentes échelles.

La ressource en eau étant source de conflits (voir l'encadré page ci-contre), ces adaptations devront intégrer la notion d'équité entre les acteurs concernés. La gestion par bassin-versant devra s'attacher à une gestion solidaire entre bassins voisins, sans oublier que les aménagements ont des impacts non seulement locaux, mais aussi à grande échelle sur les écosystèmes fluviaux, côtiers et marins.

Bibliographie

- M. Chauveau et al., *Quels impacts des changements climatiques sur les eaux de surface en France à l'horizon 2070 ?*, La Houille Blanche, n°4, pp. 5-15, 2013.
 S. Ambec et al., *Water Sharing Agreements Sustainable to Reduced Flows*, *Journal of Environmental Economics and Management*, vol. 66, pp. 639-655, 2013.
 Site internet sur le projet Explore 2070 : <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Evaluation-des-strategies-d.html>

Vers une écologie de la santé

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

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

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

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

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

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

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

Déclenchement des épidémies

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

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

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

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

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

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

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

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

Le rôle de la température

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



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

Le paradoxe de la mortalité hivernale

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

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

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

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

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

Les maladies et leurs vecteurs

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

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

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



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

gique des plantes et la dispersion des spores et bactéries.

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

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

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

Le rôle de l'homme

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

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

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

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

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

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

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

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



B. Chaubert - INRA



Lindgren et al., Environmental Health Perspectives, 2000



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

Les principales causes d'émergence

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

L'écologie de la santé

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

Principales causes d'apparition des nouveaux agents infectieux

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

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

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

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

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

Anticiper les évolutions

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

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

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

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

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



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

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

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

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

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

Bibliographie

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

Comment gérer les flux migratoires ?

François Gemenne est chercheur en science politique, CEARC – UVSQ / CEDEM – ULg, expert associé et enseignant au CERI - Sciences Po.

Des zones littorales inondées ; des épisodes de sécheresse intenses. Il faudra aider les régions d'accueil à gérer la pression démographique due aux populations poussées à l'exode.

Les catastrophes naturelles imposant déplacements, exodes et évacuations ont été innombrables au cours des siècles. Le tremblement de terre qui détruisit Lisbonne en 1755, ou le grand incendie qui ravagea Londres en 1666, ont entraîné d'importants flux de réfugiés. Aux États-Unis, en 1927, l'inondation du delta du Mississippi déplça 700 000 habitants, avant que la sécheresse du Dust Bowl et les tempêtes de poussière qui ont caractérisé cet épisode catastrophique des années 1930 ne poussent plus d'un million d'habitants des Grandes Plaines à migrer vers la Californie. Pendant longtemps pourtant, académiques comme décideurs ont considéré que les facteurs susceptibles d'entraîner des migrations – volontaires ou forcées – étaient avant tout d'ordre politique ou économique.

Aujourd'hui, le lien de causalité entre les dégradations de l'environnement et la décision migratoire est transformé par le changement climatique : à la fois parce que les mouvements de populations liés aux transformations de l'environnement sont appelés à prendre une ampleur sans précédent, mais également – et peut-être surtout – parce que le changement climatique pose la question de la responsabilité de ces déplacements. Alors qu'on invoquait auparavant la fatalité des catastrophes naturelles, la responsabilité des États industrialisés est désormais directement en cause.

On sait encore peu de chose, pourtant, quant à la façon dont les populations réagissent à la dégradation de leurs habitats. Si le phénomène des « migrations environnementales » n'est pas nouveau, ce n'est que récemment que le concept a émergé dans les milieux académiques et *a fortiori* politiques. Cette

émergence a été concomitante de celle du changement climatique dans les cénacles internationaux. S'il est difficile de prévoir l'ampleur des flux migratoires engendrés par le changement climatique, il est néanmoins possible d'identifier ses principaux impacts sur les établissements humains. Le changement climatique, en effet, n'est pas un changement uniforme et aura des conséquences diverses.

Les populations vulnérables : les plus touchées

On distingue généralement trois types d'impacts du changement climatique sur les flux migratoires : l'intensité accrue des catastrophes naturelles, la hausse du niveau des mers et la raréfaction des ressources d'eau potable – aussi appelée stress hydrique. Ces trois types de changements ne produiront pas des migrations similaires, et n'appellent pas des stratégies d'adaptation identiques.

En premier lieu, le changement climatique se traduira par une augmentation de la fréquence et de l'intensité des catastrophes naturelles : les inondations seront plus nombreuses, et les ouragans plus violents. Au cours des dernières années, le nombre de catastrophes naturelles a déjà augmenté de façon significative, en premier lieu à cause de la plus grande vulnérabilité des populations exposées : une catastrophe n'est jamais purement naturelle, mais résulte de la rencontre d'un risque naturel et d'une population vulnérable. Les catastrophes naturelles touchent particulièrement les pays du Sud, et l'Asie est de loin le continent le plus concerné. On a longtemps imaginé que les catastrophes naturelles ne provoquaient pas de flux migratoires, mais plutôt des déplacements temporaires de population.

Depuis l'ouragan Katrina, on sait que cette affirmation est fautive : un peu moins de la moitié de la population de La Nouvelle-Orléans n'est jamais revenue dans la ville. Les déplacements provoqués par les catastrophes naturelles n'offrent pas toujours la possibilité d'un retour dans la région d'origine.

Des conséquences peu prévisibles

Un autre impact du changement climatique sera la hausse du niveau des mers, provoquée à la fois par l'expansion thermique des océans et la fonte des calottes glaciaires. On estime ainsi que le niveau des océans montera d'environ un mètre d'ici 2100, même si des variations régionales se produisent. Or les régions côtières et des deltas comptent parmi les plus densément peuplées : de nombreuses métropoles y sont installées, et seront directement menacées d'inondation si des mesures d'adaptation ne sont pas prises (digues, restauration des littoraux, etc.). Les petits États insulaires sont également particulièrement vulnérables à toute hausse, même faible, du niveau des mers. Potentiellement, si des mesures d'adaptation importantes ne sont pas prises rapidement, les populations des régions de faible élévation pourraient être contraintes, à terme, de se déplacer.

Enfin, le changement climatique se traduira aussi par une raréfaction des ressources en eau potable : il s'agit sans nul doute d'un de ses impacts les moins directement visibles, mais parmi les plus dévastateurs. Cette raréfaction des ressources en eau résultera de trois facteurs concomitants : les nappes phréatiques seront contaminées par l'eau de mer ; la désertification s'intensifiera dans de nombreuses régions ; enfin, en raison de la fonte des glaciers, les ressources en eau douce diminueront.

Les effets du stress hydrique sur les mouvements migratoires sont difficiles à prévoir : plusieurs études ont ainsi montré que les migrations ont tendance à diminuer pendant les périodes de sécheresse. On peut néanmoins émettre l'hypothèse que des manques d'eau de

longue durée pousseraient à l'exil les populations touchées.

Les termes de réfugiés environnementaux, ou de réfugiés climatiques, sont trompeurs, car les populations contraintes à se déplacer à cause des changements de l'environnement ne sont pas considérées comme des réfugiés, au sens de la Convention de Genève de 1951. Si celles qui se déplacent à l'intérieur de leur pays sont normalement couvertes par les principes directeurs relatifs aux déplacements internes, adoptés par les Nations unies en 1998, celles qui se déplacent à l'extérieur de leur pays ne sont couvertes par aucun statut juridique.

Si la protection juridique de ces migrants reste, pour une large part, encore à construire, les différentes politiques d'adaptation s'imposent aujourd'hui comme la variable déterminante des flux migratoires à venir. Même si elles restent imparfaitement définies, ces politiques d'adaptation peuvent prendre des formes diverses, telles que renforcement des digues, transformation de l'habitat, diversification de l'économie, réorganisation des pratiques agricoles, etc.

Le développement de stratégies d'adaptation dans les régions d'origine sera le seul moyen de limiter l'ampleur des flux migratoires. Dans bien des cas, la migration sera l'option ultime, qui ne sera envisagée que dans l'hypothèse où les différentes stratégies d'adaptation auront échoué.

Toutefois, l'adaptation ne saurait être réservée à la région d'origine : les migrations, surtout quand elles sont soudaines et massives, entraînent une pression démographique accrue sur les ressources de la région de destination. Ces ressources ne concernent pas uniquement l'accès à la nourriture ou à l'eau potable, mais aussi l'emploi ou le logement. Les régions de destination sont généralement pauvres et souvent incapables de faire face à des afflux de migrants. Ce n'est qu'en développant des mesures d'adaptation que les régions d'accueil des migrants

pourront faire face à une pression démographique accrue.

Enfin, la migration elle-même, loin de représenter un échec de l'adaptation, peut aussi, dans certains cas, être développée comme une stratégie d'adaptation à part entière. Dans ce cas, le choix migratoire sera délibéré, et permettra aux migrants de réduire leur vulnérabilité aux impacts du changement



Évacuer les victimes des inondations sera un enjeu essentiel pour les responsables locaux (Bangkok, en Thaïlande, 4 novembre 2011).

climatique, tout en relâchant la pression démographique dans leur région d'origine. Ces stratégies peuvent être efficaces dans les cas de dégradations progressives de l'environnement, et notamment dans des situations de désertification. L'enjeu politique sera alors de faciliter la migration, plutôt que d'essayer de l'empêcher.

En conclusion, on peut affirmer que l'environnement, aujourd'hui, représente un facteur croissant de migrations, et surtout de migrations forcées. Mais *in fine*, ce sont bien les politiques qui seront mises en œuvre, et en particulier les politiques d'adaptation, qui détermineront l'ampleur et la nature des mouvements migratoires à venir.

Bibliographie

- F. Gemenne, *Why the numbers don't add up: a review of predictions and forecasts for environmentally-induced migration*, Global Env. Change, vol. 21 (S1), pp. 41-49, 2011.
F. Gemenne, *Géopolitique du Changement Climatique*, Armand Colin, 2009.

Les enjeux économiques

Pierre-Alain Jayet est directeur de recherche INRA, UMR Économie publique, INRA-AgroParisTech, Grignon.

Stéphane De Cara est directeur de recherche INRA, UMR Économie publique, INRA-AgroParisTech, Grignon.

Nathalie de Noblet-Ducoudré est directeur de recherche CEA, Unité mixte CEA-CNRS-UVSQ, Gif-sur-Yvette.

Modifier l'usage des sols pour concilier production agricole et maîtrise des émissions de gaz à effet de serre : les économistes cherchent à intégrer ces différents objectifs dans une approche globale.

Avec près de 6 gigatonnes d'équivalent dioxyde de carbone libérées chaque année dans le monde (sur un peu moins de 50 gigatonnes de dioxyde de carbone émises globalement en 2010), les sources agricoles de gaz à effet de serre pèsent plus que les transports. À ces émissions agricoles, il convient d'ajouter celles dues aux changements d'usage des sols, en particulier la déforestation. Ensemble, les secteurs liés à la terre (notamment l'agriculture et la forêt) comptent parmi les plus importants contributeurs à l'effet de serre au plan mondial. Par conséquent, l'agriculture et la forêt ont un rôle essentiel à jouer tant vis-à-vis de l'atténuation des émissions que de l'adaptation au changement climatique.

La nécessité de réduire les émissions de gaz à effet de serre tout en s'adaptant au changement climatique et en répondant aux besoins alimentaires et non alimentaires d'une population mondiale croissante soulève diverses questions : comment optimiser la production agricole et, plus largement, les usages des sols dans ce contexte ? Comment inciter producteurs et consommateurs à modifier efficacement

leurs modes de production et leurs comportements alimentaires ? Pour quel résultat environnemental ? Ces questions ne sont pas seulement d'ordre agronomique, écologique ou climatique. Elles impliquent également de prendre correctement en compte les conséquences du changement climatique sur les systèmes économiques, du niveau microéconomique (l'exploitation agricole par exemple) au niveau macroéconomique (implications pour les usages des sols au sens large, répartition de l'effort d'atténuation entre les secteurs, conséquences sur les marchés mondiaux). Ces différentes échelles d'analyse font appel à plusieurs types de modèles économiques, lesquels fournissent une approche quantitative des marges de manœuvre des politiques publiques en matière d'atténuation et d'adaptation.

Comment atteindre un objectif d'atténuation donné au coût le plus faible pour la société ? Cette question de l'efficacité en coût est à la base de l'économie de l'environnement. L'efficacité en coût implique de mobiliser en priorité les potentiels d'atténuation là où ils sont les moins coûteux. Parce que les conditions de production, et donc les coûts de