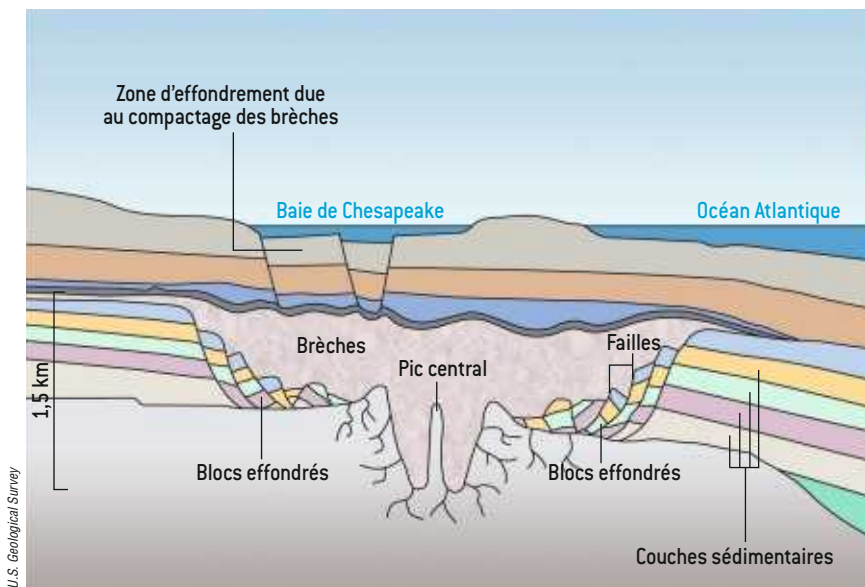
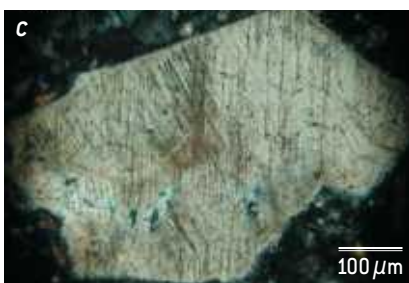




3. LE PROFIL DU CRATÈRE DE LA BAIE DE CHESAPEAKE révèle l'ampleur du bouleversement géologique opéré par la chute de la météorite : le choc a créé une énorme dépression remplie de débris, ce qui a modifié le cours des rivières locales (donnant à la baie sa forme si particulière) et bouleversé la situation et le fonctionnement des aquifères, qui, pour la plupart, ne livrent plus qu'une eau saumâtre peu consommable.



4. LES BRÈCHES OBSERVÉES AU MICROSCOPE révèlent l'effet de l'impact. Un grain de quartz choqué (c) est strié de multiples fissures laissées par les cisailages dus à de violentes ondes de choc. Des coupes (a et b) de deux brèches d'impact révèlent des fragments de diverses roches ainsi que du matériau fondu figé.

Ces brèches sont caractéristiques de la présence d'un cratère météoritique ; c'est notamment le cas des suévites, mélanges de fragments rocheux divers, mais aussi des quartz choqués produits par les impacts.

Dans les carottes, nous avons aussi découvert certaines brèches renfermant de l'eau de mer restée intacte depuis 35 millions d'années... Or pour couvrir les besoins des deux millions d'habitants vivant dans les villes entourant le cratère, de nombreux forages ont été réalisés à la recherche d'eau douce : ils n'ont produit que de l'eau saumâtre. Cette constatation étonnante s'explique par le piégeage d'eau de mer et donc de sel dans le sol. Notre découverte va donc permettre de localiser la zone de l'impact où l'eau souterraine est non salée – et par conséquent, les zones non polluées par l'impact, où les nappes phréatiques seront exemptes de sel.

Des traces de tsunami

Une autre surprise fut la découverte au cours de l'un de nos forages d'un immense bloc de granite enfoui sous les autres déchets. De plusieurs centaines de mètres d'épaisseur et long de plus d'un kilomètre, il provient nécessairement d'une autre zone, car les bancs de granite les plus proches se trouvent à six kilo-

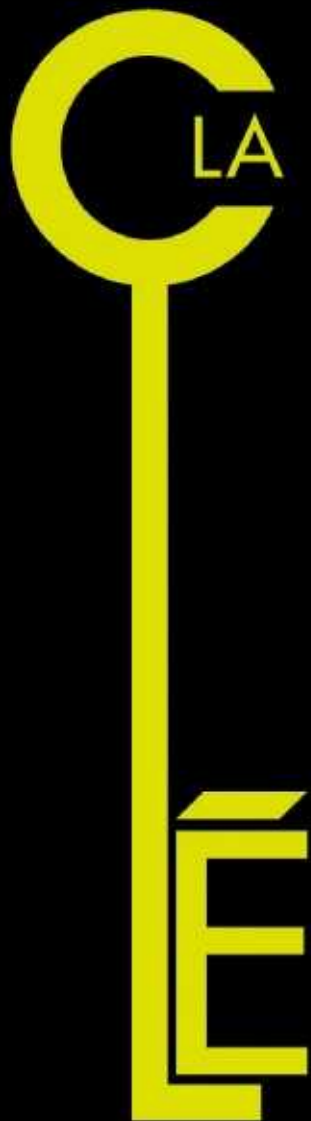
mètres. En outre, il a probablement franchi la distance séparant son origine de son lieu de dépôt en quelques minutes, voire quelques secondes et avant le reflux de la mer, car il se trouve coincé entre une couche de roches concassées, provenant du socle local, et le matériel chaotique charrié par la mer lors de son reflux. Sans doute aura-t-il glissé à grande vitesse sur les pentes du cratère central, ce que confirme le fait que les brèches sous-jacentes ont été broyées à l'état de gravier, voire de sable.

Les débris rocheux qui surmontent le bloc de granite ont eux-mêmes été amoncelés dans le cratère par le reflux de la mer. Dans les carottes, nous avons découvert les traces du passage d'un tsunami : une strate bien définie partout dans le cratère, mais constituée d'un mélange particulièrement chaotique de débris divers, dont certains étaient situés dans des couches géologiques qui, avant l'événement, étaient séparées par des centaines de mètres d'épaisseur de sol !

Nommée tsunamite, pareille couche se reconnaît notamment à sa granulométrie de plus en plus fine du bas vers le haut, caractéristique d'une sédimentation dans des eaux particulièrement agitées.

Notre étude nous a aussi livré d'intéressantes informations sur la structure géologique de la région, notamment sur les variations du niveau de la mer. Les géologues savent en effet dire si des sédiments ont été déposés sur terre ou sous l'eau, ce qui renseigne sur la position de la ligne des eaux à diverses époques. En outre, les fossiles marins piégés dans les sédiments correspondent souvent à des organismes dont on sait à quelle profondeur ils vivent, ce dont on déduit à quelle profondeur ils se trouvaient quand ils ont été fossilisés. Tous ces éléments nous ont renseignés sur la tectonique locale, c'est-à-dire sur les mouvements et les déformations de la croûte terrestre locale dans la région. Nous avons également été surpris de découvrir que même à 1,8 kilomètre de profondeur, dans la partie chaude du cratère, certaines formes de vie ont réussi à se maintenir.

L'exploitation des données prélevées dans la baie de Chesapeake va encore durer plusieurs années, mais, grâce aux résultats déjà acquis, nous connaissons désormais bien mieux l'impact... géologique d'un impact... météoritique sur un plateau continental marin. ■



Pour la Science



Les Dossiers

76 €

seulement, au lieu de 102,50 €

Soit
les Dossiers
offerts !

DES SCIENCES



Retrouvez en plus l'intégralité de votre magazine en ligne et téléchargez les articles de votre choix compris dans votre abonnement sur www.pourlascience.fr

BULLETIN D'ABONNEMENT

À retourner accompagné de votre règlement à :
Service Abonnements • Pour la Science
8, rue Férou • 75278 Paris cedex 06

☐ **Oui**, je m'abonne à **Pour la Science** (12 numéros) + les **Dossiers** (4 numéros) pour **1 an**

76 € au lieu de 102,50* € Participation aux frais de port : Europe (hors France) 12 € par an, autres pays 25 € par an.

☐ **Oui**, je m'abonne à **Pour la Science** seul (12 numéros) pour **1 an**

56 € au lieu de 74,70* € Participation aux frais de port : Europe (hors France) 12 € par an, autres pays 25 € par an.

☐ J'accepte de recevoir par e-mail des informations de *Pour la Science*.

☐ J'accepte de recevoir par e-mail des informations des partenaires commerciaux de *Pour la Science*.

Mes coordonnées (à remplir) :

Nom, prénom : _____

Adresse : _____

Code postal : _____ Ville : _____

Pays : _____

E-mail** : _____

Téléphone** : _____

Date de naissance** : _____

Je règle par :

☐ Chèque à l'ordre de *Pour la Science*

☐ Carte bancaire

Numéro de la carte _____

Date d'expiration _____ Code de sécurité*** _____

Signature obligatoire _____

Comment éviter la prochaine PANDÉMIE ?

Un réseau international surveillant les transferts de virus entre les animaux et l'homme permettrait aux scientifiques d'éviter les grandes épidémies.

Nathan Wolfe

Nous suivions des chimpanzés sauvages de la forêt de Kibale en Ouganda depuis presque cinq heures. Mais ils venaient d'arrêter leurs grognements et leurs hurlements, et nous les avions perdus. Soudain, nous les avons repérés : ils se tenaient au pied d'un gros figuier et regardaient un groupe de singes colobes rouges en train de manger et de jouer.

Les colobes ne se souciaient pas des trois grands singes. Ces derniers se séparèrent : pendant que le « chef » rampait vers le figuier, ses compagnons se glissèrent silencieusement vers deux arbres voisins. En un instant, le chef grimpa sur son arbre en poussant des cris perçants. Les colobes essayaient de fuir, mais l'un des chimpanzés en embuscade se saisit d'un jeune et le traîna au sol, prêt à partager sa prise.

Les chimpanzés mangeaient la chair et les entrailles crues du petit singe ; je constatais alors que cette scène présentait des conditions favorables pour que des micro-organismes « sautent » d'une espèce à l'autre. Tout agent infectieux présent dans l'organisme du petit singe avait bénéficié des conditions idéales pour contaminer un nouveau type d'hôte : les chimpanzés manipulaient et consommaient des organes crus ; leurs mains étaient couvertes de sang, de salive et de fèces, qui peuvent contenir des agents pathogènes ; du sang et d'autres fluides organiques éclaboussaient leurs yeux et leurs narines. Toute plaie sur le corps des chasseurs offrait une porte d'entrée vers le sang.

De fait, avec d'autres équipes, nous avons montré que la chasse, par des animaux tels les chimpanzés, mais aussi par les hommes, permet à des virus de passer de la proie au prédateur. La forme pandémique du sida a débuté de cette façon, le virus étant passé des singes aux chimpanzés et ensuite, des chimpanzés aux hommes.

La chasse au virus

Aujourd'hui, le virus de l'immunodéficience humaine, ou VIH, est si répandu qu'il est difficile d'imaginer le monde sans lui. Mais une épidémie mondiale, ou pandémie, du sida aurait pu être évitée. Si dès les années 1960 et 1970, les scientifiques avaient recherché les signes de nouvelles infections chez les Africains, ils en auraient su davantage sur le virus avant qu'il n'infecte des millions de personnes. Avec un tel avantage dès le départ, les épidémiologistes auraient pu intervenir et ralentir la progression du virus.

Le VIH n'est pas le seul virus issu d'un réservoir animal (voir l'encadré page 54). Plus de la moitié des maladies infectieuses humaines proviennent des animaux, par exemple la grippe, le SRAS (le syndrome respiratoire aigu sévère), la dengue et la fièvre Ébola. Et aujourd'hui, toutes les populations humaines sont reliées par les transports routiers et aériens, de sorte que de nouvelles maladies peuvent devenir pandémiques rapidement, qu'elles viennent directement des animaux sauvages, tel le VIH, ou indirectement, en passant

L'ESSENTIEL

- ✓ La plupart des maladies infectieuses humaines proviennent des animaux.
- ✓ Les épidémiologistes pensaient que les animaux domestiques étaient la source de ces fléaux.
- ✓ Mais les animaux sauvages ont transmis de nombreuses maladies, dont l'infection par le VIH.
- ✓ Les micro-organismes infectant ces animaux et les personnes en contact avec eux sont étudiés pour que l'on repère rapidement les maladies infectieuses émergentes.



LES ANIMAUX SAUVAGES, tel ce chimpanzé, peuvent porter des agents pathogènes susceptibles d'être transmis à l'homme ; pour éviter les pandémies, il faut donc surveiller les réservoirs des virus animaux.

des animaux sauvages aux animaux domestiques, puis à l'homme, comme dans le cas du virus de l'encéphalite japonaise et de certaines souches du virus de la grippe.

Nous avons donc mis au point un nouveau plan pour surveiller les animaux sauvages et les personnes en contact avec eux ; l'objectif est de chercher des signes de nouveaux micro-organismes ou des changements du nombre des infections. Ce système de surveillance représenterait la première alerte nécessaire pour éviter les pandémies.

Il y a dix ans, au Cameroun en Afrique centrale, nous avons étudié des virus chez les villageois qui chassent et abattent des animaux sauvages, mais qui les gardent aussi comme animaux de compagnie. Nous voulions déterminer si de nouvelles souches du VIH pouvaient infecter ces populations humaines, et nous suspicions que ces chasseurs camerounais avaient un risque infectieux élevé.

Pourquoi pensions-nous que ces populations étaient vulnérables ? Considérons un chasseur vaquant à ses occupations. Ce dernier ne porte qu'un short en coton et il marche pieds nus le long d'un sentier forestier, portant sur le dos un babouin d'une vingtaine de kilogrammes. Il a transporté l'animal pendant plusieurs kilomètres, et il a encore un long chemin à parcourir avant d'atteindre son village. À mesure que le chasseur marche, le sang de sa proie se mélange à sa sueur et goutte le long de sa jambe, où existent peut-être quelques coupures. Tout agent infectieux contenu dans le sang du babouin risque de contaminer le chasseur.

Si ce chasseur avait le choix, il préférerait le porc ou le bœuf au singe. Mais les protéines animales sont rares : comme le font les hommes depuis des millénaires, le chasseur d'Afrique centrale chasse la faune locale. Ses proies lui permettent de survivre, mais elles sont susceptibles de lui transmettre des virus et autres micro-organismes. Au contraire, dans les pays développés, le cerf et le bœuf ne présentent pas ce risque, car ils ont un lien de parenté plus éloigné avec les hommes.

Il n'a pas été facile de persuader les villageois de coopérer avec nous. Beaucoup craignaient que nous nous emparions de leur gibier. Après avoir gagné leur confiance, nous avons commencé à recueillir des données ; en plus de prélever des échan-

L'AUTEUR



Nathan WOLFE est professeur de biologie humaine à l'Université Stanford, aux États-Unis, et directeur du programme *Global viral forecasting initiative*.

tillons de leur sang et de leur poser des questions sur leur santé et leurs activités de chasse, nous leur avons demandé de récupérer du sang des animaux qu'ils avaient tués, au moyen de papiers-filtres que nous leur avions fournis.

Grâce aux analyses de sang, nous avons trouvé plusieurs virus animaux non observés auparavant chez l'homme. L'un de ces agents infectieux est le spumavirus simien ou SFV (pour *Simian foamy virus*), qui appartient à la même famille de virus – les rétrovirus – que le VIH. Le spumavirus simien existe chez la plupart des primates non humains, y compris les cercopithèques, les mandrills et les gorilles du Cameroun, et chacune de ces espèces héberge son propre variant, génétiquement distinct, du virus.

Virus d'animal et d'homme

Nous avons découvert que ces trois variants viraux colonisaient aussi les populations de chasseurs. Par exemple, un homme âgé de 45 ans qui rapporta avoir chassé et abattu des gorilles – des animaux pourtant peu chassés – avait contracté le spumavirus du gorille.

Dans les mêmes populations d'Afrique centrale, nous avons découvert différents rétrovirus nommés virus T-lymphotropiques humains (HTLV pour *Human T lymphotropic virus*) : ils infectent les lymphocytes T, des cellules du système

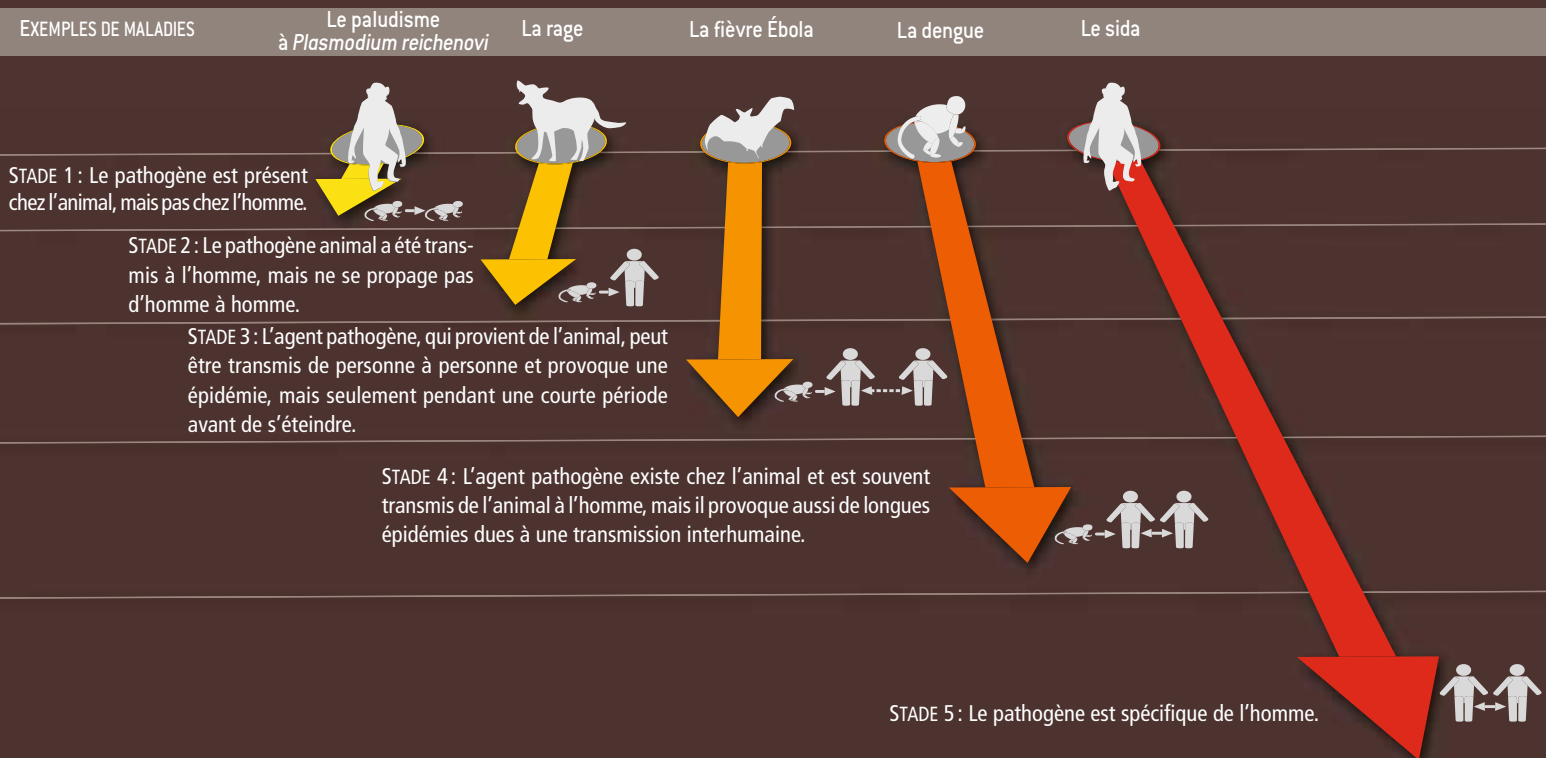
Les maladies issues des animaux sauvages

La plupart des maladies infectieuses de l'homme proviendraient des animaux sauvages. Il faut donc surveiller les micro-organismes de ces animaux sauvages, en plus de ceux du bétail. Voici dix de ces maladies et les animaux qui les auraient transmises à l'homme.

MALADIE	SOURCES
Sida	Chimpanzés
Hépatite B	Grands singes
Grippe de type A	Oiseaux sauvages
Peste	Rongeurs
Dengue	Primates
Maladie du sommeil d'Afrique	Ruminants sauvages et domestiques
Paludisme à vivax	Macaques asiatiques
Fièvre jaune	Primates africains
Maladie de Chagas	Différents mammifères sauvages et domestiques

La pandémie : une évolution en cinq étapes

Cinq stades sont nécessaires pour qu'un micro-organisme animal se transforme en un pathogène spécifique de l'homme. Les agents infectieux peuvent rester bloqués dans chacun de ces stades. Ceux des premiers stades, le virus Ébola par exemple, peuvent être très meurtriers, mais ils font peu de victimes, car ils ne peuvent pas se propager chez l'homme. Plus un virus est transmissible chez l'homme, plus il est susceptible de provoquer une pandémie.



immunitaire. Deux de ces virus, le HTLV-1 et le HTLV-2, sont déjà connus, car ils touchent des millions de personnes dans le monde et entraînent des cancers et des maladies neurologiques chez certains malades. Mais HTLV-3 et HTLV-4, que nous avons décrits en 2005, étaient nouveaux. Étant donné la similitude génétique entre le HTLV-3 et son homologue simien, le STLV-3, il semble que ce virus ait été transmis *via* les singes infectés par le STLV-3 et chassés par l'homme. L'origine du HTLV-4 reste inconnue, mais nous découvrirons peut-être son ancêtre primate en explorant davantage ces virus simiesques.

Nous ignorons pour l'instant si le spumavirus ou ces nouveaux virus T-lymphotropiques humains provoquent des maladies chez l'homme. Les virus ne rendent pas toujours malades la personne qu'ils infectent, mais quand c'est le cas et s'ils se propagent d'un individu à un autre, ils n'engendrent pas toujours de pandémies ; la plupart du temps, ils s'éteignent spontanément. Mais comme ces virus sont de la même famille que le VIH, responsable d'une épidémie mondiale, les épidémiologistes doivent les surveiller de près.

Nous avons défini cinq stades permettant la transformation d'un pathogène

Et les animaux de compagnie ?

✓ **Les animaux sauvages et ceux d'élevage ne sont pas les seules sources potentielles d'agents pathogènes humains. Les chiens, les chats et les rats – et d'autres animaux de compagnie – peuvent héberger des agents pathogènes pour l'homme. C'est le cas notamment quand les animaux de compagnie sont au contact d'animaux sauvages porteurs de germes. Ces derniers peuvent passer aux animaux de compagnie, qui les transmettent alors à leurs maîtres.**



animal en un pathogène spécifique de l'homme (voir l'encadré ci-dessus). Dans le premier stade, l'agent infectieux est uniquement présent chez l'animal. Dans le deuxième, il peut être transmis à un homme par un animal. Au troisième stade, le germe se transmet surtout des animaux à l'homme, mais il peut aussi se propager parmi les hommes, avant de disparaître. Quand l'agent infectieux atteint le quatrième stade, il peut persister chez l'homme. Au dernier stade, il est un pathogène exclusif de l'homme et il n'a plus besoin d'hôte animal pour se multiplier et se propager. Les pathogènes des quatrième et cinquième stades peuvent causer des pertes humaines importantes.

Si nous avions observé les chasseurs africains il y a 30 ans, nous aurions peut-être détecté et stoppé le VIH plus tôt, avant qu'il ne devienne pandémique. Aujourd'hui il est trop tard. À présent, la question est : comment empêcher l'attaque de futurs virus ?

Comme il nous est possible d'étudier des populations éloignées, nous espérons étendre nos travaux pour suivre les transmissions des virus animaux aux hommes, partout où c'est envisageable. Avec une surveillance mondiale, nous pourrions



Karl Ammann

- Pays : Cameroun
- Virus déjà observés : VIH
- Population étudiée à la recherche de nouveaux pathogènes : les chasseurs d'animaux sauvages.

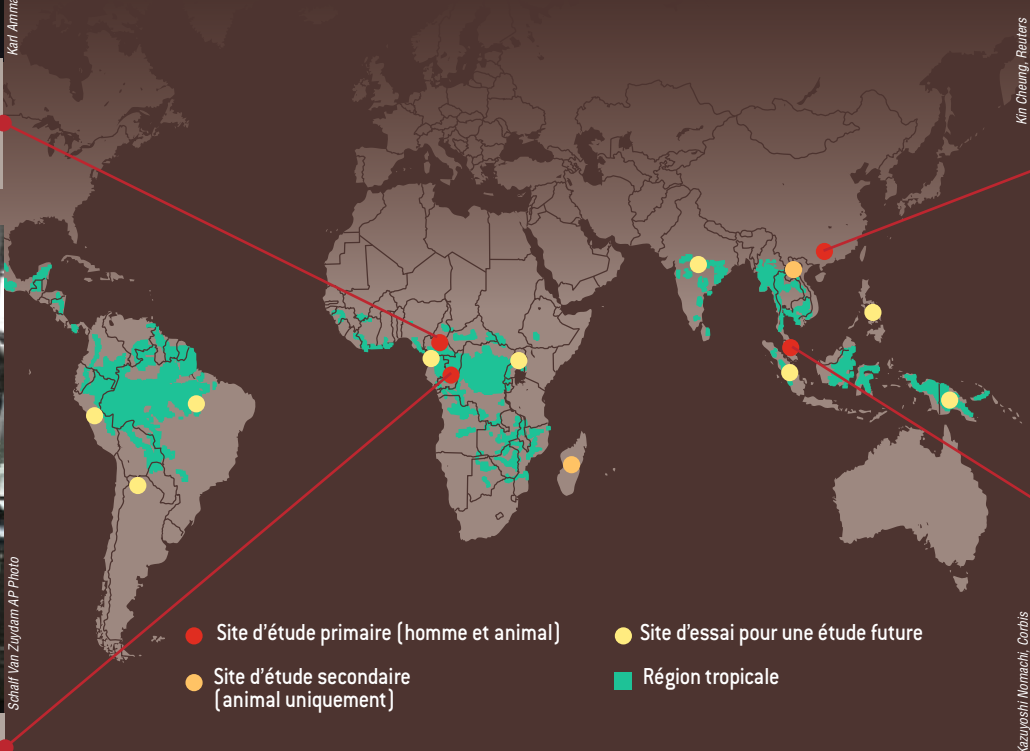


Schaff Van Zuydam AP Photo

- Pays : République démocratique du Congo
- Virus déjà observés : le virus de Marburg, le virus de la variole du singe, le virus Ebola
- Population étudiée : les chasseurs d'animaux sauvages.

Un réseau de surveillance mondial

En surveillant les micro-organismes chez les animaux sauvages et les populations exposées à ces animaux, les scientifiques pourraient repérer une maladie infectieuse avant qu'elle ne se répande. De fait, l'auteur vient de créer le *Global viral forecasting initiative* – réseau global de prévision des infections virales. Ce réseau est constitué de 100 scientifiques et responsables de Santé publique (*points rouges et orange*) qui surveillent les agents potentiellement dangereux quand ils passent de l'animal à l'homme. Ce programme se concentre notamment sur les régions tropicales (*en vert*), parce qu'elles abritent une grande variété d'espèces animales et que les hommes sont en contact avec ces animaux. Ce réseau pourrait être étendu à d'autres pays qui présentent une grande biodiversité, tels ceux représentés sur la carte (*points jaunes*).



Kim Chung, Reuters

Kazuyoshi Nomachi, Corbis

peut-être déclencher l'alarme avant qu'une maladie infectieuse n'émerge.

En collaboration avec *google.org* et la Fondation Skoll, nous avons créé le *Global viral forecasting initiative* (GVFI, réseau global de prévision des infections virales), un programme où des épidémiologistes, le personnel de Santé publique et des biologistes du monde entier collaborent pour identifier les agents infectieux là où ils émergent et pour les surveiller quand ils passent des animaux à l'homme et se propagent. Ce programme rassemble le maximum d'informations concernant l'ensemble des pathogènes – les virus, les bactéries, les parasites – qui passent des animaux à l'homme.

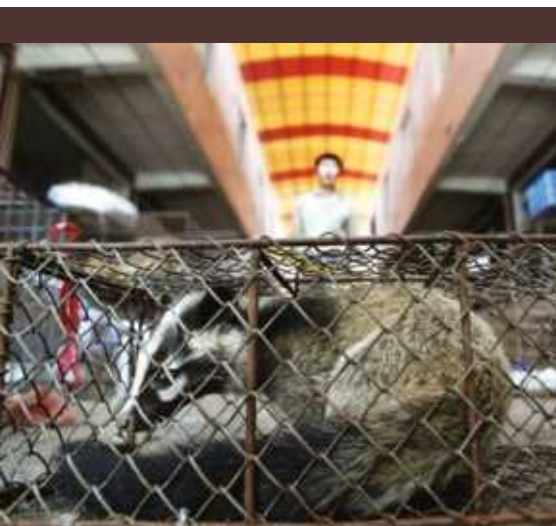
Bien que ces travaux soient récents, notre programme dispose d'une centaine de scientifiques qui suivent des populations ou des animaux sentinelles au Cameroun, en Chine, en République démocratique du Congo, au Laos, à Madagascar et en Malaisie, c'est-à-dire dans toutes les régions favorables à l'émergence de maladies infectieuses (voir l'encadré ci-dessus). On surveille des chasseurs, mais aussi d'autres personnes présentant un risque important de contracter des maladies à partir de la faune, tels les vendeurs sur les marchés en Asie où sont présents des animaux vivants.

Toutefois, la découverte d'un nouveau micro-organisme chez un chasseur n'est

qu'une première étape. Nous devons ensuite déterminer si ce pathogène engendre une maladie, s'il est transmissible d'homme à homme, et s'il a été détecté dans des villes où la densité élevée des habitants favorise sa propagation. L'apparition d'un pathogène dans un centre urbain, loin de sa source, serait un signe inquiétant d'une éventuelle pandémie.

Le sang contaminé

Dans le cas des virus HTLV-3 et HTLV-4, nous vérifions régulièrement si ces virus se retrouvent dans les populations à risque des villes proches des endroits où émer-



- Pays : Chine
- Virus déjà observés : SRAS, H5N1
- Population étudiée : les commerçants sur les marchés.



- Pays : Malaisie
- Virus déjà observé : le virus Nipah
- Population étudiée : les chasseurs d'animaux sauvages.

gent la plupart des maladies infectieuses. Les populations à risque sont par exemple les personnes souffrant de drépanocytose – une maladie héréditaire caractérisée par l'altération de l'hémoglobine, la protéine de transport de l'oxygène dans le sang – qui reçoivent des transfusions sanguines pour traiter leur maladie.

Si nous découvrons des individus infectés dans ces populations, nous devons lancer un programme mondial de surveillance des approvisionnements en sang. De fait, nous tentons de mettre au point de nouveaux tests diagnostiques qui permettent de vérifier la présence de ces virus dans le sang.

Il serait aussi utile de déterminer le mode de transmission d'un agent pathogène : nous saurions alors quelles tactiques adopter pour bloquer sa propagation. Par exemple, si un virus est sexuellement transmissible, les responsables de santé publique pourraient lancer des campagnes d'information recommandant l'utilisation du préservatif.

Les gouvernements peuvent aussi prendre certaines mesures pour éviter que le sang conservé dans les banques ne soit contaminé par de nouveaux virus. Par exemple, après nos découvertes concernant la relation entre l'exposition à des primates non humains et l'apparition de nouveaux virus, le gouvernement canadien a modifié sa politique de don du sang : celle-ci exclut désormais les donneurs ayant eu des contacts avec des primates non humains.

C'est l'affaire de tous

En plus de nos tentatives de prévention, des programmes informatiques tels que *HealthMap* et *Promed* compilent des rapports quotidiens sur les épidémies dans le monde entier, et des systèmes d'alerte sur internet, tels que ceux pilotés par *google.org*, utilisent l'ensemble des données pour prévoir les épidémies de grippe.

De même, on a montré que les systèmes de surveillance des pays concernés et de l'Organisation mondiale de la santé joueront un rôle majeur pour stopper la prochaine épidémie de peste.

Pour notre part, nous aimerions étendre notre réseau de surveillance à d'autres pays, tels le Brésil et l'Indonésie, qui présentent une grande diversité d'espèces animales. Si notre programme réussit à prévenir ne serait-ce qu'une seule pandémie dans les 50 prochaines années, le coût investi sera minime comparé aux bénéfices humains et financiers.

Les hommes essaient de prédire diverses menaces naturelles, tels les ouragans, les tsunamis, les tremblements de terre et les éruptions volcaniques. Nous n'avons aucune raison de croire que prévoir les pandémies est plus difficile. Étant donné les sommes d'argent colossales nécessaires pour stopper une pandémie, les dégâts humains qu'elle engendre, et les conséquences néfastes qu'elle a sur l'économie, il est préférable de la stopper dès son apparition, et ce à moindre coût. Le principe de prévention n'a jamais été plus judicieux. ■

Une transmission à double sens



Wilfried Knechtwost, Getty Images

✓ **Non seulement les pathogènes passent de l'animal à l'homme, mais ils peuvent aussi circuler dans l'autre sens. Les maladies infectieuses que l'homme transmet à l'animal sont par exemple la tuberculose (le bétail est concerné), la fièvre jaune (les singes d'Amérique du Sud), la rougeole (les gorilles) et la poliomyélite (les chimpanzés).**

✓ BIBLIOGRAPHIE

N. Wolfe *et al.*, *Origins of major human infectious diseases*, *Nature*, vol. 447, pp. 279-283, mai 2007.

N. Wolfe *et al.*, *Bushmeat hunting, deforestation, and prediction of zoonotic disease emergence*, *Emerging Infectious Diseases*, vol. 11, pp. 1822-1827, décembre 2005.

N. Wolfe *et al.*, *Emergence of unique primate T-lymphotropic viruses among central african bushmeat hunters*, *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 102, pp. 7994-7999, mai 2005.

N. Wolfe *et al.*, *Naturally acquired simian retrovirus infections in central african hunters*, *Lancet*, vol. 363, pp. 932-937, mars 2004.

✓ SUR LE WEB

Le site du programme *Global viral forecasting initiative* : www.gvfi.org.



La *propulsion* des nanorobots

Thomas Mallouk et Ayusman Sen

L'ESSENTIEL

- ✓ En s'inspirant des moteurs biologiques à l'œuvre dans les cellules, les chimistes mettent au point des machines microscopiques propulsées par des réactions catalytiques.
- ✓ À cette échelle, les nanorobots doivent lutter contre des lois physiques capricieuses : les fluides paraissent aussi visqueux que du miel et l'agitation moléculaire rend les trajectoires chaotiques.
- ✓ Ces nanorobots motorisés pourraient à terme administrer des médicaments, assembler d'autres machines, ou effectuer des opérations de microchirurgie.

Des moteurs catalytiques qui utilisent le fluide environnant comme combustible propulsent aujourd'hui des robots microscopiques. Ils ouvrent la voie à de nombreuses applications.

Imaginez des bistouris, des pelleteuses ou des arcs à souder aussi petits que des bactéries. De minuscules outils robotisés, injectés dans le corps, pourraient localiser et neutraliser les sources de maladie, par exemple les plaques dans les artères ou les dépôts de protéines associés à la maladie d'Alzheimer. Ces nanomachines – des robots à l'échelle du nanomètre – pourraient aussi pénétrer dans les poutres des ponts ou les ailes des avions pour y réparer d'invisibles fissures avant qu'elles ne s'aggravent et provoquent des catastrophes.

Ces dernières années, les chercheurs ont créé tout un ensemble de remarquables structures à l'échelle moléculaire, qui pourraient devenir les composants de ces

minuscules machines. Une voiture moléculaire dotée de quatre fullerènes (des molécules de carbone en forme de ballon de football) en guise de roues, 5 000 fois plus petites qu'une cellule humaine, a ainsi été mise au point.

Mais sous le capot de cette nanoviture, pas de trace de moteur. Elle ne se déplace qu'au gré des collisions aléatoires avec les molécules du milieu environnant, un processus connu sous le nom de mouvement brownien. C'est actuellement le plus grand problème des nanomachines : nous savons les construire, mais pas comment les faire se déplacer.

À l'échelle d'une cellule ou au-dessous, le déplacement pose des défis spécifiques. L'air et l'eau paraissent aussi épais que de la mélasse, et le mouvement brownien s'op-

