

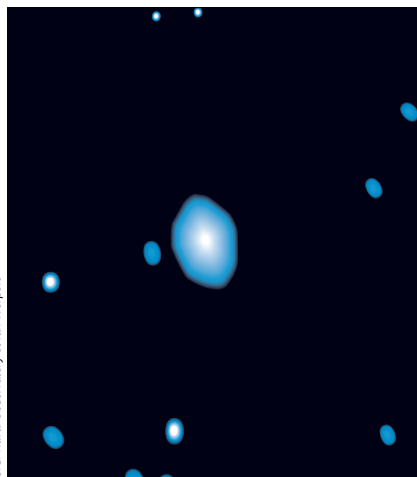
sion de la lumière d'un quasar lointain en 30 000 canaux spectroscopiques laisse très peu d'intensité dans chaque canal. Pendant plus de 20 ans, cette lumière est restée invisible. La technique fonctionne aujourd'hui grâce à des détecteurs améliorés, plus efficaces, au télescope Keck de Hawaï (son miroir a un diamètre de dix mètres) et à des spectrographes à haute résolution et haut débit, comme l'instrument HIRES du Keck.

En attendant la lumière

Après de nombreuses tentatives infructueuses à l'aide de plus petits télescopes, mes collègues Antoinette Songaila et Lennox Cowie, de l'Université d'Hawaï, ont pu observer un quasar à l'aide du télescope Keck, en novembre 1993. Ils ont pointé l'instrument vers le quasar 0014+813, célèbre parmi les astronomes pour son éclat (pendant plusieurs années, il fut l'objet le plus brillant connu dans l'Univers).

On savait qu'un nuage de gaz primordial se trouvait devant ce quasar. Le premier spectre enregistré, après quelques heures seulement d'observation, révéla la présence du deutérium cosmique : ce spectre comportait les traces de l'absorption par de l'hydrogène en mouvement, et un écho presque parfait de la raie Lyman alpha, décalé vers le bleu par le deutérium. L'intensité de ce second signal résulterait de la présence de deux atomes de deutérium pour 10 000 atomes d'hydrogène. Ce résultat a été confirmé par Robert Carswell et ses collègues de l'Université de Cambridge, qui ont utilisé le télescope Mayall, de quatre mètres de diamètre, à Kitt Peak, en Arizona. Les deux observations indépendantes confirment que la répartition des vitesses du deutérium est, comme prévu, exceptionnellement étroite.

Une partie de l'absorption observée pourrait résulter de l'interposition fortuite d'un petit nuage d'hydrogène qui s'éloignerait de nous à 82 kilomètres par seconde plus lentement que le nuage principal. Dans ce cas, le deutérium serait moins abondant que nous ne l'avons calculé. Bien que la probabilité d'une telle coïncidence soit faible, nous devons considérer notre estimation comme préliminaire et étudier, avec la même méthode, les nuages situés devant d'autres quasars. À ce jour, huit nuages ont été étudiés.



U.S. Naval Observatory et Ian Worpole

5. LE QUASAR 0014+813 est un des objets du cosmos les plus brillants que nous connaissons. Il apparaît ici sur une image prise par un radiotélescope. L'absorption de la lumière émise par ce quasar, à la limite de l'Univers observable, fournit les premières mesures du deutérium primordial.

L'un des résultats les plus intrigants a été obtenu par David Tytler et Scott Burles, de l'Université de San Diego, et par Xiao-Ming Fan, de l'Université Columbia : dans le nuage qu'ils ont étudié, la quantité de deutérium semble dix fois inférieure à celle que nous avons calculée. Pourquoi cet appauvrissement ? Le deutérium a-t-il été brûlé dans des étoiles ou la production de deutérium a-t-elle été moins uniforme que ne le prédit le Big Bang (voir l'encadré) ?

Voir la matière sombre

Si notre valeur élevée est correcte, l'Univers contient bien deux baryons pour dix milliards de photons, en accord avec la théorie du Big Bang. Avec cette proportion de baryons, les prédictions du Big Bang sont également cohérentes avec les quantités de lithium dans les étoiles les plus vieilles et avec les estimations de l'hélium primordial observé dans des galaxies proches pauvres en éléments lourds. La confirmation de notre mesure serait remarquable : elle indiquerait que les cosmologistes comprennent ce qui s'est passé une seconde à peine après le commencement de l'expansion de l'Univers, et que l'histoire de la matière aux grandes distances ressemble à celle de la matière proche, conformément au modèle le plus simple de l'Univers.

L'estimation de η que donne l'observation des nuages est conforme à ce que nous observons aujourd'hui dans

l'Univers : en estimant la densité totale de photons de l'Univers et en la rapportant à cette valeur de η , on calcule que l'Univers contient un atome par dix mètres cubes d'espace. C'est à peu près ce que l'on trouve quand on détermine directement le nombre d'atomes de l'Univers en tenant compte de toute la matière présente sous la forme de gaz, d'étoiles, de planètes ou de poussières. Ainsi l'Univers ne contiendrait-il pas beaucoup de baryons invisibles. Pourtant l'observation des galaxies et de leur halo indique que leurs mouvements ne sont explicables que si beaucoup de matière est invisible (au moins dix fois la densité moyenne des baryons visibles). La quantité élevée de deutérium que nous avons mesurée indique que cette matière invisible n'est pas la matière atomique ordinaire.

Les cosmologistes ont envisagé de nombreuses possibilités. Par exemple, la théorie du Big Bang prédit que l'Univers contient presque autant de neutrinos que de photons. Si chacun possédait une masse de quelques milliardièmes de celle du proton (soit quelques électronvolts), la masse totale des neutrinos serait presque égale à celle des baryons. Il se peut aussi que l'Univers ait initialement contenu une ou plusieurs particules exotiques. Quoi qu'il en soit, le modèle du Big Bang, conforté par les observations, fournit un cadre pour prédire les conséquences de ces nouvelles idées pour l'astrophysique.

Craig HOGAN dirige le département d'astrophysique de l'Université de Washington, à Seattle.

Steven WEINBERG, *Les trois premières minutes de l'Univers*, Éditions du Seuil, 1978.

F.H. SHU, *The Physical Universe : An Introduction to Astronomy*, University Science Books, Mill Valley, Californie, 1982.

J. SILK, *A Short History of the Universe*, W.H. Freeman and Company, 1994.

A. SONGAILA, L.L. COWIE, C.J. HOGAN et M. RUGERS, *Deuterium Abundance and Background Radiation Temperature in High-Redshift Primordial Clouds*, in *Nature*, vol. 368, pp. 599-604, 14 avril 1994.

Cosmic Abundances, ASP Conference Series, vol. 99, sous la direction de S.S. Holt et G. Sonneborn, Astronomical Society of the Pacific, 1996.

C.J. HOGAN et P.J.E. PEEBLES, *The History of the Galaxies*, in *Nature*, vol. 381, pp. 489-495, 6 juin 1996.

La menace permanente des armes biologiques

LEONARD COLE

Les États et les terroristes fourbissent aujourd'hui des armes biologiques. Des contrôles plus stricts devront les dissuader de les utiliser.

Le 20 mars 1995, des terroristes tuaient 12 personnes et en blessaient 5 500 en libérant du sarin dans le métro de Tokyo. Cette attaque – dans l'un des pays les plus sûrs du monde! – aurait pu tuer des milliers de personnes si le mélange utilisé avait été plus pur.

Le sarin a été produit pour la première fois en Allemagne, en 1930. Une seule goutte mise au contact de la peau ou inhalée tue une personne en quelques minutes. Comme toutes les substances s'attaquant au système nerveux, le sarin bloque l'action de l'acétylcholinestérase, une enzyme nécessaire à la transmission de l'influx nerveux.

La secte responsable de l'attaque au sarin, Aum Shinrikyo («Vérité suprême»), cherchait aussi à mettre au point des agents biologiques. C'est une perspective effrayante, car, contrairement aux agents chimiques, les bactéries et les virus sont contagieux et se reproduisent.

Certains agents biologiques invalident les victimes, mais d'autres les tuent. Le virus *Ebola*, par exemple, tue jusqu'à 90 pour cent des personnes qu'il infecte en un peu plus d'une semaine : il provoque la dissolution des tissus conjonctifs, ainsi que des hémorragies ; au stade terminal, les victimes infectées sont prises de convulsions, projettent du sang contaminé tout autour d'elles, tandis qu'elles sont prises de convulsions, tremblent et se débattent dans leur agonie.

On ne dispose d'aucun traitement pour soigner une infection par le virus *Ebola*, et l'on connaît mal les mécanismes de contamination : on ignore si

la transmission se fait par contact avec les victimes, avec leur sang, avec leurs fluides corporels ou avec les corps morts, ou même si l'air que l'on respire est lui-même contaminant. Au cours de la dernière épidémie, au Zaïre, les autorités sanitaires ont imposé des mesures d'isolement dans certaines régions, jusqu'à ce que la maladie s'éteigne.

On s'effraie que des individus ou des États envisagent d'utiliser de tels virus comme arme. En octobre 1992, Shoko Asahara, le chef de la secte Aum, est allé au Zaïre avec 40 de ses adeptes. Officiellement ils partaient aider les victimes d'*Ebola*, mais une enquête du Sénat américain a montré qu'ils cherchaient à se procurer des échantillons du virus, pour les cultiver et les utiliser au cours d'attentats biologiques.

Aux États-Unis aussi, des personnes ont tenté de se procurer des organismes dangereux afin de fabriquer des armes. Le 5 mai 1995, six semaines après l'attaque dans le métro de Tokyo, Larry Harris, un laborantin de l'Ohio, commanda à un laboratoire spécialisé la bactérie responsable de la peste bubonique et s'est ainsi procuré trois ampoules de la bactérie *Yersinia pestis*.

L. Harris fut découvert, parce que, quatre jours après avoir passé sa commande, il téléphona pour demander pourquoi il n'avait encore rien reçu.

1. PENDANT LA GUERRE DU GOLFE, en 1991, des voyageurs ont dû porter des masques à gaz dans l'aéroport de Tel Aviv, en raison des menaces d'armes biologiques et chimiques que faisait peser l'Irak.



M. Milner, Sygma

Cette impatience et son apparente ignorance des techniques de laboratoire étonnèrent les responsables du laboratoire, qui avertirent la police. On découvrit que L. Harris était membre d'une association raciste. Pour obtenir la bactérie de la peste, Harris avait seulement eu besoin d'une carte de crédit et d'une fausse lettre à en-tête. Promulguée en avril 1996, en partie à la suite de cet incident, une loi américaine antiterroriste exige maintenant du Centre de contrôle et de prévention des maladies un suivi plus minutieux lors de l'envoi d'agents infectieux.

Qu'aurait fait L. Harris avec les bactéries? Il affirma qu'il voulait entre-

prendre des recherches pour lutter contre l'action des rats irakiens porteurs de «supergermes». S'il avait voulu obtenir un arsenal biologique, cela n'aurait pas été très difficile: à raison d'une division toutes les 20 minutes, une seule bactérie engendre un milliard de descendants en une dizaine d'heures. Or, pour certaines maladies, telles que l'anthrax (la maladie du charbon), l'inhalation de quelques milliers de bactéries est fatale.

Kathleen Bailey, une ancienne directrice adjointe de l'Agence américaine pour le contrôle des armements et pour le désarmement, est convaincue qu'un arsenal biologique complet pourrait être fabriqué, avec 50 000 francs de

matériel, dans une pièce de cinq mètres sur cinq. En effet, on peut cultiver, sans grands risques, des centaines de milliards de bactéries avec un équipement aussi peu élaboré qu'un fermenteur pour la bière et un milieu de culture contenant des protéines, un masque à gaz et une combinaison de protection en matière plastique.

Heureusement, le terrorisme biologique reste très limité. En septembre 1984, par exemple, 750 personnes ont été prises de malaises après avoir déjeuné dans divers restaurants d'une ville de l'Oregon. Ma Anand Sheela, qui fut jugée pour cet empoisonnement en 1986, avoua qu'avec d'autres membres d'une secte locale, elle avait



répandu des salmonelles sur les salades présentées sur des buffets, dans quatre restaurants de la ville ; les bactéries avaient été cultivées dans les laboratoires du ranch de la secte. Après deux ans et demi de prison, M.A. Sheela, qui avait été l'assistante du gourou de la secte, fut libérée et expulsée vers l'Europe.

D'autre part, les militaires ont peu employé les armes biologiques. Le premier de ces usages semble avoir eu lieu en 1345-1346, en Crimée, alors que la peste ravageait les rangs des attaquants mongols qui assiégeaient Caffa, un port de la mer Noire. Au moyen de trébuchets, les Mongols envoyèrent des cadavres pestiférés par-dessus l'enceinte de la ville ; la peste se répandit dans Caffa, puis, de ce port, vers les autres ports de la Méditerranée. Plus tard, en Amérique, un officier britannique distribua à des Indiens des couvertures contaminées provenant d'un centre de traitement de la variole, afin de déclencher une épidémie parmi les tribus indiennes. Enfin, dans les années 1930, des bactéries de la peste ont été utilisées par le Japon contre la Chine.

Aujourd'hui, un paradoxe se dessine : le nombre des États ayant ratifié les conventions internationales de destruction des armes chimiques et biologiques est plus important qu'il ne l'a jamais été, mais, simultanément, celui des États soupçonnés de fabriquer ces armes biologiques augmente. En 1980, seule l'Union soviétique avait été accusée par les États-Unis de violer la convention de 1972, qui interdit toute possession ou fabrication d'armes biologiques.

En 1989, la CIA estimait qu'une dizaine de pays construisaient des armes biologiques. En 1995, ce nombre atteignait 17 : l'Iran, l'Irak, la Libye, la Syrie, la Corée du Nord, Taiwan, Israël, l'Égypte, le Vietnam, le Laos, Cuba, la Bulgarie, l'Inde, la Corée du Sud, l'Afrique du Sud,

la Chine et la Russie (le gouvernement russe affirme avoir interrompu ses programmes d'armement biologique, mais les officiels américains en doutent).

Une réalité lugubre

Les cinq premiers de cette liste – l'Iran, l'Irak, la Libye, la Syrie et la Corée du Nord – sont particulièrement inquiétants, en raison de leur comportement. Après la guerre du Golfe, par exemple, l'Irak a reconnu avoir possédé des missiles Scud équipés d'ogives biologiques dès 1991. L'instabilité latente en Europe de l'Est, au Moyen Orient et en Asie du Sud-Ouest risque d'encourager un nombre croissant de pays à fabriquer des armes biologiques et chimiques.

L'élimination des armes biologiques et chimiques devrait être un objectif de l'ensemble des nations : on doit éviter

à tout prix un fléau d'origine humaine, dû au virus *Ebola*, par exemple.

Ce désarmement biologique est d'autant plus impératif que, dans de nombreux cas, toute la population ne pourrait être protégée contre une attaque biologique. Les vaccins préviennent certaines maladies, mais on ne peut vacciner toute la population contre toutes les maladies possibles. Les antibiotiques ne sont pas efficaces contre toutes les bactéries et de plus en plus de souches bactériennes résistent aux traitements. En outre, avec les méthodes du génie génétique, on pourrait concevoir de nouveaux organismes contre lesquels vaccins et antibiotiques seraient sans effet.

Les combinaisons de protection ne sont guère confortables, mais, heureusement, la plupart des agents biologiques n'agissent pas à travers la peau intacte : des masques à gaz et des vêtements usuels devraient suffire à

protéger la plupart des personnes exposées contre de nombreux agents pathogènes, qui seraient alors détruits assez vite par le soleil et par la chaleur. Certains, toutefois, peuvent subsister indéfiniment dans l'environnement : l'île Gruinard, au large de l'Écosse, resta infectée par des bacilles charbonneux pendant 40 ans après les essais d'armes biologiques qui y furent réalisés dans les années 1940 ; selon Rex Watson, qui dirigeait le Département britannique de la défense chimique et biologique, si Berlin avait été bombardée avec des bacilles charbonneux pendant la Seconde Guerre mondiale, la ville serait encore contaminée.

Même si de nombreux Israéliens se sont habitués à porter un masque à gaz pendant la guerre du Golfe, on imagine difficilement d'imposer, pendant des mois ou des années, de tels équipements aux populations civiles vivant dans les régions exposées. Par temps très chaud, même les militaires ne supportent pas leur masque plus d'un quart d'heure.



Photo: Robert, Sygma

2. DES VICTIMES DU VIRUS EBOLA ont été enterrées dans des fosses communes, à Kikwit, au Zaïre, en 1995. La secte japonaise Aum a pensé utiliser ce virus comme une arme biologique potentielle.

Pour toutes ces raisons, les demandes de programmes efficaces de défense contre la guerre biologique se sont multipliées, notamment après la guerre du Golfe. Les partisans d'un renforcement de la recherche dans ce domaine proposent souvent de protéger civils et militaires par des vaccins et par des équipements spéciaux, mais une difficulté incontournable demeure : à moins de connaître à l'avance l'agent pathogène employé comme arme et à moins d'avoir affaire à un micro-organisme sensible aux médicaments disponibles, toute défense est illusoire.

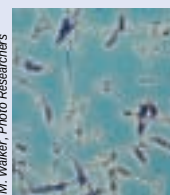
L'exemple de la guerre du Golfe fait imaginer des défenses inappropriées. On suppose que les armes biologiques de l'Irak étaient des bacilles charbonneux et la toxine botulique (bien que les toxines soient des produits de micro-organismes, elles sont considérées comme des agents biologiques, d'après le traité de 1972 sur les armes biologiques). Ces deux agents sont sensibles à des vaccins et aux traitements disponibles, et l'on aurait sans doute pu protéger les soldats. Des recherches visant à améliorer la défense contre ces agents sont en cours.

Que se passerait-il toutefois si les belligérants utilisaient des agents moins connus ? Il semble illusoire de croire que la recherche puisse procurer prochainement des moyens de défense contre des micro-organismes encore inconnus. De surcroît, un système de défense civil contre les armes biologiques et chimiques serait très onéreux : en 1969, un rapport des Nations unies indiquait que le stockage des masques à gaz, des antibiotiques et des vaccins destinés à la population civile dépasserait 20 milliards de dollars (100 milliards de francs). Aujourd'hui, on estime cette dépense à quelques 80 milliards de dollars (400 milliards de francs).

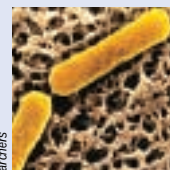
La mise au point des vaccins et des équipements de protection ne sont pas les seules difficultés posées par une guerre biologique ; le micro-organisme utilisé serait difficile à identifier rapidement au milieu d'un champ de bataille. Comment même savoir qu'une attaque biologique a été déclenchée ? Les recherches sur la détection des micro-organismes pathogènes, potentiellement utilisés lors d'une guerre biologique, ont été renforcées.

En mai 1994, le secrétaire américain à la Défense John Deutch a publié un rapport sur les mesures visant à limiter la prolifération des armes de des-

Les agents biologiques potentiels



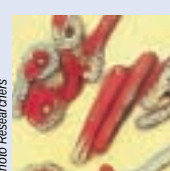
M. Walker, Photo Researchers



CNRI Science Photo Library/Photo Researchers



Photo Researchers



Le bacille du charbon. Il est responsable de la maladie du charbon. Les symptômes apparaissent deux à trois jours après son inhalation. Les premiers symptômes sont ceux des infections respiratoires ; puis le malade a une forte fièvre, il vomit, il a des douleurs articulaires, des difficultés à respirer, des hémorragies. L'exposition au bacille peut être fatale. Les vaccins et les antibiotiques ont une action protectrice, sauf quand la quantité de bacilles inhalée est excessive.

La toxine botulique. Produite par les bactéries *Clostridium botulinum*, elle est responsable du botulisme. Les symptômes apparaissent entre 12 et 72 heures après l'ingestion ou l'inhalation. Les premiers symptômes sont des nausées et des diarrhées, puis une grande faiblesse, des étourdissements et une paralysie respiratoire qui provoque souvent la mort. Une antitoxine est parfois salvatrice.

Yersinia pestis. C'est l'agent causal de la peste bubonique, la peste noire du Moyen Âge. Quand les bactéries atteignent les poumons, les symptômes, dont la fièvre et le délire, apparaissent en trois ou quatre jours. Les cas non traités sont presque toujours mortels. Les vaccins préviennent la maladie, et les antibiotiques sont généralement efficaces, à condition d'être administrés rapidement.

Le virus Ebola. Il est très contagieux et mortel. Il ne serait sans doute pas un agent pathogène utilisable, car on ignore s'il est stable dans l'environnement, hors de l'hôte. Les symptômes apparaissent deux ou trois jours après l'exposition : de fortes fièvres, des délires, des douleurs articulaires intenses, des saignements, des convulsions et, finalement, la mort. On ne dispose d'aucun traitement.

truction de masse. Il préconisait d'intensifier les recherches sur les nouvelles méthodes de spectroscopie qui améliorent la détection des agents pathogènes présents dans l'air. La mise au point d'un détecteur efficace d'agents pathogènes sera longue, mais les biologistes achèvent aujourd'hui la construction d'un système qui identifie divers agents en reconnaissant leurs antigènes à l'aide d'anticorps.

Dans ces dispositifs, des prélèvements d'air sont exposés à des anticorps répertoriés ; si l'air réagit, c'est qu'il contient le micro-organisme spécifique de l'anticorps. La réaction, qui s'effectue en une trentaine de minutes, permet d'identifier quatre agents : *Bacillus anthracis* (la bactérie de la maladie du charbon), *Yersinia pestis* (de la peste bubonique), la toxine botulique (le poison libéré par le bacille du botulisme) et l'entérotoxine B du staphylocoque (libérée par certaines souches de staphylocoques). On recherche des anticorps spécifiques d'autres agents biologiques, mais les organismes et les toxines qui pourraient être utilisés comme armes de guerre sont nombreux, et tous ne pourront peut-être pas être détectés par cette méthode.

Aussi la prévention restera-t-elle la mesure de protection la plus efficace contre la guerre et le terrorisme biologiques. La surveillance des maladies émergentes est ainsi devenue une préoccupation du gouvernement américain. On devrait établir des bases de données sur les maladies endémiques de par le monde, afin de détecter les épidémies insolites ; on pourrait alors prendre rapidement des mesures pour limiter la circulation des hommes et les échanges commerciaux. On identifierait ainsi plus efficacement les épidémies d'origine offensive.

De plus, on devrait vérifier que la Convention sur les armes biologiques de 1972 est correctement appliquée, notamment en inspectant les sites militaires. Les 139 pays signataires de la convention se sont réunis au mois de décembre 1996, afin d'élaborer de telles procédures d'inspection. À la suite de la conférence précédente, qui s'était tenue en 1991, un comité, nommé Verex, avait établi une liste de mesures envisageables, telles que la surveillance des journaux scientifiques ou l'inspection des sites potentiels de production d'agents contaminants

Les moyens de défense contre les armes biologiques

Masque à gaz. Des filtres, généralement constitués de charbon actif, bloquent les particules supérieures à un micromètre. Des combinaisons sont également recommandées pour protéger les blessures ouvertes et les régions où la peau est lésée.

Les abris. Les meilleurs sont des chambres fermées, isolées par des films de plastique (ou par tout autre matériau imperméable) et ventilées avec de l'air filtré.

La décontamination. Des désinfectants classiques, tel le formaldéhyde (le formol), sont utilisés pour stériliser les surfaces.

Les vaccins. Les vaccins sont spécifiques des agents infectieux ; certains nécessitent plusieurs injections, étalées dans le temps, avant d'être efficaces. On ne dispose pas de vaccin contre tous les agents infectieux.

Les antibiotiques. Ils sont efficaces contre certaines bactéries, mais pas contre toutes, et ils sont inutiles contre les virus. Dans certains cas, le traitement antibiotique doit commencer dans les heures qui suivent l'exposition, avant que les symptômes n'apparaissent.

Les systèmes de détection. Seuls quelques dispositifs rudimentaires sont disponibles. Des recherches sont en cours pour augmenter le nombre d'agents susceptibles d'être détectés, sur des champs de bataille notamment.

(laboratoires, brasseries, laboratoires pharmaceutiques).

Les armes biologiques sont si faciles à produire que les accords internationaux pourront toujours être contournés, mais si les arsenaux ne détiennent pas de micro-organismes pathogènes et si l'acquisition et le transfert de ces agents sont rigoureusement contrôlés, leur obtention à des fins malveillantes sera plus difficile. Des vérifications, même minutieuses, n'apporteront pas une garantie totale, si bien que les adversaires de ces mesures soutiennent que ces efforts seront vains. Cependant, des sanctions appliquées en cas de violation des accords auraient un impact dissuasif, et un renforcement du traité affermirait l'engagement des nations à ne pas commercialiser de telles armes.

Le tabou du poison

Pourquoi les armes biologiques n'ont-elles pas été davantage utilisées jusqu'à présent ? Les utilisateurs potentiels ne savent sans doute pas bien comment se servir des micro-organismes pathogènes, et ils craignent sans doute de s'infecter eux-mêmes. En outre, les agents biologiques sont difficiles à contrôler, car des mutations risquent d'augmenter la virulence des bactéries ou des virus, ou bien, au contraire, de diminuer au cours du temps. Enfin,

une fois introduits dans l'environnement, les agents pathogènes menacent tout le monde, y compris les envahisseurs, qui ne peuvent plus occuper le territoire conquis de cette façon.

Au-delà de ces considérations pratiques, reste la répugnance à se servir de telles armes, qui tuent sans discrimination et en provoquant d'horribles douleurs. L'aversion naturelle pour les armes biologiques ne doit pas être sous-estimée ; elle retient peut-être certains terroristes, qui hésitent à utiliser des moyens qui feraient condamner leur action par le public.

La Convention contre les armes biologiques de 1972 stipule que «la conscience de l'humanité réprouverait l'emploi de telles méthodes». Cette réprobation est ancrée dans l'inconscient collectif depuis des millénaires. Jusqu'à ce que l'on comprenne, au XIX^e siècle, que les micro-organismes sont la cause des infections, on ne différenciait pas les empoisonnements des maladies ; d'ailleurs, «virus» signifie «poison», en latin. Dans de nombreuses civilisations, on s'interdisait d'empoisonner la nourriture et l'eau des puits, et d'utiliser des poisons comme armes. Les Grecs et les Romains condamnaient l'utilisation guerrière du poison, qui représentait une violation du *Jus gentium*, la loi des nations. Les poisons et les armes considérées comme inhumaines ont été

interdites par la loi Manu, en Inde, vers -500, et chez les Sarrasins, 1 000 ans plus tard. Ces interdictions, reprises par le Hollandais Hugo Grotius dans son traité de 1625, *Du droit de la guerre et de la paix*, furent généralement respectées pendant les guerres de religions qui ont sévi en Europe à la fin du XVI^e et au XVII^e siècle.

Comme les tabous concernant l'inceste, le cannibalisme ou autres actes réprouvés dans de nombreuses sociétés, celui des armes empoisonnées a parfois été violé. Ces violations ont sans doute été limitées, car elles étaient sévèrement condamnées : selon le droit des nations, «Rien n'est plus expressément interdit que l'utilisation d'armes *empoisonnées*» (en italiques dans le texte).

Selon l'historien John Ellis van Courtland Moon, la montée des nationalismes au XVIII^e siècle a affaibli l'opprobre jeté sur les armes empoisonnées. À la suite de ce qu'il nomme la «nationalisation de l'éthique», les impératifs militaires ont commencé à supplanter les considérations morales, et les États ont cherché tous les moyens possibles pour atteindre leurs objectifs en cas de conflit.

Au milieu du XIX^e siècle, quelques militaires ont envisagé d'utiliser des armes toxiques, mais nul ne l'a fait. Néanmoins, des gaz toxiques ont été employés durant la Première Guerre mondiale. L'horreur fut si grande que le Protocole de Genève de 1925 a interdit tout usage d'agents chimiques et biologiques en cas de guerre. Les photographies des victimes qui agonisaient, écumant et suffoquant, eurent un impact profond sur la société. Le texte du protocole reflète cette horreur et stipule que ces armes ont été «condamnées à juste titre par l'opinion générale du monde civilisé».

Les armes chimiques et biologiques n'ont quasiment pas été utilisées au cours des centaines de guerres et de conflits qui ont eu lieu au cours des décennies qui suivirent, jusqu'à l'attaque chimique déclenchée par l'Irak au cours de la guerre contre l'Iran. Les protestations internationales contre le comportement irakien ont malheureusement été timides et inefficaces. Entre 1983 et la fin de la guerre, en 1988, l'Irak n'a pas été mis en accusation pour ces meurtres chimiques. La crainte d'une victoire iranienne a étouffé les protestations sérieuses contre l'utilisation d'un armement qui avait été condamné unanimement.

Ce silence a eu des conséquences déplorables : l'apparente efficacité des armes chimiques, combinée à l'impunité dont a bénéficié l'Irak a encouragé d'autres pays à s'équiper d'armes chimiques et biologiques. Ironie du sort, plusieurs des pays qui s'étaient tus lorsque l'Irak avait utilisé des armes chimiques contre l'Iran ont été à leur tour menacés par les armes chimiques et biologiques irakiennes, pendant la guerre du Golfe, en 1991.

Depuis, la communauté internationale a fait pression sur l'Irak, et le Conseil de sécurité des Nations unies a pris des sanctions pour que le stock irakien d'armes biologiques et des autres armes de destruction de masse soit anéanti. L'Irak ne s'étant pas plié à ces exigences, les inspecteurs des Nations unies poursuivent leurs efforts pour obtenir des informations plus complètes sur les armements secrets irakiens.

Toutefois, les rapports des Nations unies sont factuels, sans expressions d'indignation. Or, tous les pays et tous les groupes qui mettent au point ce type d'armement méritent d'être condamnés. Nous devons sans cesse rappeler que les peuples civilisés ne doivent faire ni commerce ni usage de telles armes, et que les États-Unis et la Russie doivent détruire leurs stocks d'armes chimiques en une dizaine d'années, comme ils en sont convenus.

Comme l'indignation ne suffit pas, un contrôle strict des échanges nationaux et internationaux d'agents pathogènes, et une surveillance accrue des épidémies mondiales seront indispensables.

En attendant, on doit absolument commencer par faire respecter la Convention sur les armes chimiques, qui interdit la possession d'armes chimiques et qui dresse la liste des produits chimiques devant faire l'objet d'une déclaration par les nations signataires. Contrairement à la Convention sur les armes biologiques, de nombreuses procédures de vérification sont prévues par la Convention sur les armes chimiques, y compris des inspections impromptues quand on soupçonne qu'il y a violation des engagements. Des garanties commerciales sont accordées aux pays signataires, pour les inciter à adhérer à la convention.

La Convention sur les armes chimiques a été proposée en 1993 et, en octobre 1996, elle avait été signée par

157 pays et ratifiée par 66 : il manquait une signature pour qu'il puisse entrer en application. Le Sénat des États-Unis a bloqué la ratification, notamment parce qu'il n'acceptait pas les clauses de vérification.

Si l'on réussissait à faire appliquer le traité sur les armes chimiques, les négociations en cours sur le renforcement de la Convention sur les armes biologiques seraient probablement facilitées. Inversement, si la Convention sur les armes chimiques échoue, les perspectives d'un accord sur les protocoles de vérification de l'application du traité biologique s'amenuiseront : les arsenaux chimiques et biologiques continueront à proliférer. Or, plus ces armes persisteront, plus le sentiment de leur illégitimité s'érodera, et plus la probabilité de leur utilisation par les armées ou par les terroristes augmentera.

Comme l'ont remarqué certains experts, les terroristes utilisent généralement les armes présentes dans les arsenaux de leur pays ; notamment, les responsables de la secte Aum auraient découvert l'intérêt des armes chimiques pendant la guerre entre l'Irak et l'Iran. Si les armes biologiques et chimiques disparaissent des arsenaux, elles devraient cesser d'attirer les terroristes.

Les traités, la vérification de leur application, la surveillance du commerce des agents pathogènes doivent tous améliorer le contrôle de l'armement chimique et biologique. En insistant sur le sens moral qui rejetait jadis les armes biologiques, on augmentera les chances qu'elles soient éliminées à tout jamais.

Leonard COLE est professeur de sciences politiques à l'Université Rutgers de Newark.

Leonard A. COLE, *Clouds of Secrecy : The Army's Germ Warfare Tests over Populated Areas*, Rowman and Littlefield, 1990.

Biological Weapons : Weapons of the Future ?, sous la direction de Brad Roberts, Center for Strategic and International Studies, 1993.

Malcolm DANDO, *Biological Warfare in the 21st Century*, Macmillan, 1994.

Leonard A. COLE, *The Eleventh Plague : The Politics of Biological and Chemical Warfare*, W.H. Freeman and Company, 1996.

Les nanomatériaux

RICHARD SIEGEL

Des solides composés de grains très fins sont plus durs, plus malléables ou plus transparents que les matériaux habituels.

Un soir de septembre 1989, nous avons décidé de nommer «matériaux nanophases» la nouvelle catégorie de matériaux que nous fabriquons. Les métaux nanophases, les céramiques nanophases et autres solides nanophases, autrement nommés nanomatériaux, sont constitués des mêmes éléments chimiques que leurs homologues classiques, mais, tandis que ces derniers sont des assemblages de grains dont le diamètre varie du micromètre au millimètre, composés de plusieurs milliards d'atomes, les grains constitutifs des matériaux nanophases mesurent moins de 100 nanomètres et contiennent au plus quelques dizaines de milliers d'atomes. Un agrégat de trois nanomètres de diamètre, par exemple, contient 900 atomes et est un million de fois plus petit que le point final de cette phrase.

Les nanomatériaux ont des propriétés originales, parce que leurs petits grains réagissent très différemment des grains plus gros aux contraintes mécaniques ou aux champs électromagnétiques. Par exemple, le cuivre nanophase est cinq fois plus dur que le cuivre ordinaire, et les céramiques nanophases sont moins cassantes que leurs cousines à gros grains. Nous ajustons la dureté, la couleur ou la plasticité de ces matériaux, en choisissant la taille des grains qui les constituent.

On trouve aujourd'hui des nanomatériaux dans de nombreux produits de consommation courante, des cosmétiques à l'électronique, et la liste de leurs applications n'est pas close. La croissance de l'entreprise que nous avons fondée pour les commercialiser témoigne de ce développement : nous produisons aujourd'hui par tonnes des matériaux qui n'étaient fabriqués, il y a quelques années encore, que par milligrammes, seulement pour les laboratoires de recherche.

Les nanomatériaux sont présents depuis longtemps dans la nature, des roches des météorites aux valves des coquillages. Dès que les hommes firent du feu, ils fabriquèrent aussi des particules nanométriques de fumée. Toutefois, l'histoire scientifique des nanomatériaux n'a commencé qu'en 1959, lorsque Richard Feynman évoqua en public les potentialités des toutes petites particules de matière condensée : «Je suis certain que si nous maîtrisons la structure de la matière à petite échelle, nous accéderons à un beaucoup plus grand nombre de propriétés de la matière.»

Des confirmations théoriques de cette intuition apparurent bientôt : au début des années 1960, Ryogo Kubo, de l'Université de Tokyo, détermina le comportement quantique de petits agrégats d'atomes. Ce modèle ne décrivait pas les conséquences du confinement des atomes sur les propriétés des

matériaux, mais il les faisait pressentir : lorsque la taille des grains élémentaires d'un matériau devient inférieure à la longueur critique associée à une propriété donnée, cette propriété devient ajustable.

Des métaux à grains fins

La recherche sur les agrégats nanométriques s'est développée au cours des 20 années suivantes, surtout au Japon et en URSS. Toutefois ces recherches étaient confidentielles, et c'est seulement en 1981, lors d'un colloque au Danemark, que Herbert Gleiter, de l'Université de la Sarre, annonça que les matériaux fabriqués par compactage de particules ultrafines avaient des propriétés radicalement différentes de celles des matériaux ordinaires. Peu après, son équipe publia plusieurs articles novateurs sur les métaux nanocristallins.



1. DES SUSPENSIONS DE PARTICULES NANOMÉTRIQUES du même matériau ont des couleurs différentes selon la taille de ces particules. Chacun des flacons présentés sur les photographies contient du sélénium de cadmium : seule la taille des grains varie. Chacun a une couleur différente, en lumière blanche (à droite) et en lumière ultraviolette (ci-dessus).