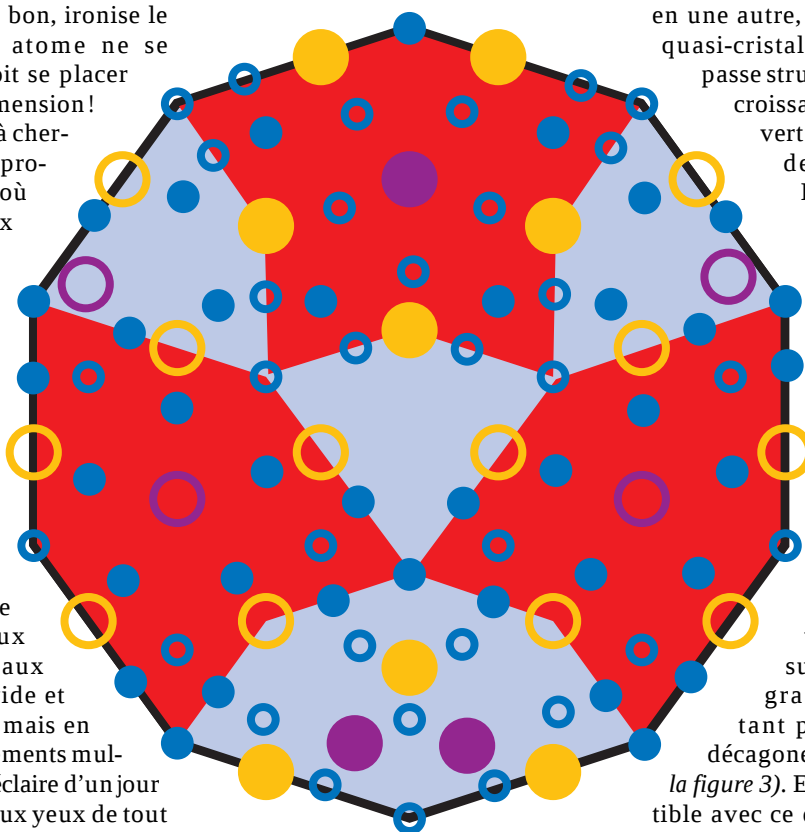


Tout cela est bel et bon, ironise le physicien, mais un atome ne se demande pas où il doit se placer dans la cinquième dimension ! Il faut donc continuer à chercher des solutions au problème dans le monde où vivent les atomes, à deux ou à trois dimensions.

Petra Gummelt, de l'Université de Greifswald, a réussi une telle entreprise (*Geometriae Dedicata*, vol. 62, pp. 1-17, 1996, et *Aperiodische Überdeckungen mit einem Clustertyp*, Shaker, Aix-La-Chapelle, 1999). Elle a généralisé la construction en ne se limitant pas aux pavages, c'est-à-dire aux recouvrements sans vide et sans chevauchement, mais en autorisant des recouvrements multiples. Cette possibilité éclaire d'un jour nouveau ce qui saute aux yeux de tout observateur des pavages de Penrose : le motif comporte de nombreux décagones réguliers. Penrose les a dénommés *cart-wheels* (roues de charrette) : leur fréquence est si élevée que chaque point de la surface est couvert par au moins une telle roue décagonale.

La théorie du pavage de Penrose fournit encore plus d'informations : deux de ces décagones ne peuvent, quand ils se chevauchent, le faire que d'une manière très particulière. Ces règles peuvent être illustrées de façon convaincante : on colorie certaines parties des décagones en rouge et l'on fixe la règle d'assemblage suivante : les décagones doivent se chevaucher en faisant correspondre les couleurs (rouge sur rouge et blanc sur blanc), et toutes les surfaces rouges doivent être recouvertes au moins deux fois (voir la figure 1).

Le résultat de Petra Gummelt rapproche les physico-chimistes de leur but, qui est d'expliquer comment se forme un quasi-cristal. D'abord, il n'existe plus qu'un seul type d'élément de pavage, dont on coud divers exemplaires comme dans un patchwork. Cette hypothèse est plus plausible que celle selon laquelle les mêmes atomes devraient être prêts à prendre



3. LA «DÉCORATION» DE PAUL STEINHARDT des décagones de Gummelt. Les grands cercles représentent des atomes de nickel (en violet), de cobalt (en jaune), et les petits cercles des atomes d'aluminium (en bleu). En recouvrant la surface de décagones en respectant les règles de superposition, on obtient une couche de l'hypothétique quasi-cristal. Sur une couche, les atomes sont disposés sur les cercles pleins, sur la couche suivante sur les cercles vides, et ainsi de couche en couche.

deux formes différentes et ce en proportion à peu près égales : généralement, un agencement donné est énergétiquement plus favorable et se produit avec une fréquence beaucoup plus élevée que d'autres. Il est donc raisonnable de penser qu'il n'y a qu'un seul type de motif.

D'autre part, la forme du décagone est déjà relativement arrondie. Que des atomes s'assemblent en une telle cellule, ou en ce qui lui correspond en trois dimensions, paraît moins saugrenu que la forme très pointue du losange.

La croissance difficile

Enfin, quand la croissance d'un quasi-cristal, qui se fait par additions successives d'éléments conformément aux règles de chevauchement des décagones, aboutit à une impasse, le grand nombre des configurations possibles fait que les éléments se replacent en une position permettant la poursuite du processus. Certaines pièces de la construction déjà en place pourraient passer d'une configuration autorisée

en une autre, également possible. Le quasi-cristal sortirait ainsi de l'impasse structurelle, poursuivant sa croissance sur le chemin de la vertu, guidé par la recherche de l'énergie minimale. L'organisation idéale est celle qui présente la plus forte densité maximale réalisable en décagones.

Paul Steinhardt, un physicien de l'Université de Princeton, a développé cette idée. Il a trouvé une décoration du décagone par les atomes, qui non seulement respecte les règles de chevauchement, mais qui de surcroît, rapportée à une grande surface, est d'autant plus favorable que les décagones sont plus denses (voir la figure 3). En outre, elle est compatible avec ce que l'on sait des forces

entre les atomes. Seul inconvénient : en général les quasi-cristaux existant réellement ne se préoccupent pas de petites différences

d'énergie entre les divers états. Les quasi-cristaux sont souvent obtenus par refroidissement rapide, et leur état peut être fortement hors d'équilibre.

Jusqu'ici, toutes ces considérations sont faites en deux dimensions, ce qui ne gêne pas leur vérification, car il existe effectivement des quasi-cristaux constitués de telles surfaces empilées périodiquement : ils sont quasi périodiques en deux dimensions et périodiques dans la troisième dimension.

L'objectif à long terme est d'appliquer à l'espace les techniques développées avec succès par Petra Gummelt dans le plan. Des travaux que Peter Kramer a publiés sur l'Internet <http://xxx.lanl.gov/abs/math-ph/9904001> pourraient y contribuer : il propose une structure dans un espace abstrait de dimension élevée, dont les décagones sont les projections à deux dimensions.

Christoph PÖPPE est rédacteur à la revue *Spektrum der Wissenschaft*.

La guerre biologique contre les cultures

PAUL ROGERS • SIMON WHITBY • MALCOLM DANDO

Les armées et les terroristes disposent d'une arme redoutable : les micro-organismes qui dévastent les cultures vivrières.

Le 25 novembre 1969, le président américain Richard Nixon annonce que les États-Unis renoncent aux techniques de guerre biologique. Le gouvernement américain explique l'abandon de ces armes par leur intérêt militaire limité.

Toutefois, en 1989, Matthew Meselson, biologiste moléculaire à l'Université Harvard et spécialiste d'armement biologique, donne d'autres explications au Sénat américain : les armes biologiques sont une menace aussi importante que les armes nucléaires ; leur mise au point et leur production sont plus simples et moins chères que les armes nucléaires ; enfin, le programme américain d'armement biologique offensif peut être facilement copié. Aussi, ce programme serait une menace pour la sécurité des États-Unis.

Les Romains ont été les premiers à utiliser des armes biologiques : ils empoisonnaient les réserves d'eau des ennemis en y jetant des cadavres d'animaux. Depuis, les armes biologiques évoquent souvent des épidémies mortelles, tels le charbon ou la peste, déclenchées à des fins militaires ou terroristes. Pourtant, les armes biologiques qui détruisent les cultures plutôt que les populations ont également une importante capacité destructrice.

Au début des années 1960, à l'Institut de recherche sur la protection des végétaux de Pretoria, J.E. Van Der Plank observe que l'expression «épidémie explosive» prend tout son sens en temps de guerre : peu d'explosifs sont aussi destructeurs qu'un agent pathogène qui s'accroît au rythme de 40 pour cent par jour pendant plusieurs mois. De nombreux types de spores (des

formes que prennent les plantes ou les micro-organismes pour résister aux conditions défavorables) se propagent aussi facilement que de la fumée lorsqu'elles sont dispersées au bon endroit, au bon moment. Tel le virus de la grippe qui a tué 20 millions de personnes en 1918 en se propageant dans l'air, les spores de nombreux agents pathogènes des cultures passent de plantes en plantes, transportées par le vent ou par la pluie. Par ailleurs, la plupart des pathologies végétales se répandent rapidement pendant la période de croissance de la plante, ont une courte période d'incubation et atteignent visiblement les feuilles.

Le potentiel de la guerre contre les cultures

En 1972, la Convention sur les armes biologiques et les toxines impose aux États signataires d'arrêter leurs recherches sur les armes biologiques et de détruire leurs stocks. Bien qu'elle ait été signée par 141 pays, les craintes de guerre biologique ont considérablement augmenté ces dix dernières années : le terrorisme utilise des armes de plus en plus redoutables, et l'on a appris que l'Irak avait un programme actif d'armes biologiques, avec un armement anti-cultures, avant la guerre du Golfe.

La recherche irakienne sur les armes biologiques a commencé dans les années 1970, et elle s'est intensifiée entre 1985 et 1991 : les biologistes militaires ont étudié des agents pathogènes de l'homme, tel le bacille du charbon, et des toxines, telles la toxine botulique (présente dans certaines conserves avariées) et l'aflatoxine (une toxine de moisissure responsable d'une nécrose du

foie). Contre les cultures, l'Irak étudiait plusieurs espèces de champignons du genre *Tilletia*, qui provoquent le charbon du blé : des masses de spores noires remplacent la partie florale des plants infectés, puis se propagent aux autres plants. Le champignon du charbon du blé produit également de la triméthylamine, un gaz inflammable capable de détruire les moissonneuses qui récoltent des grains contaminés. Les charbons du blé, endémiques en de nombreux endroits du monde, réduisent considérablement les récoltes. La cible probable des essais irakiens était l'Iran, où le blé est la principale culture céréalière.

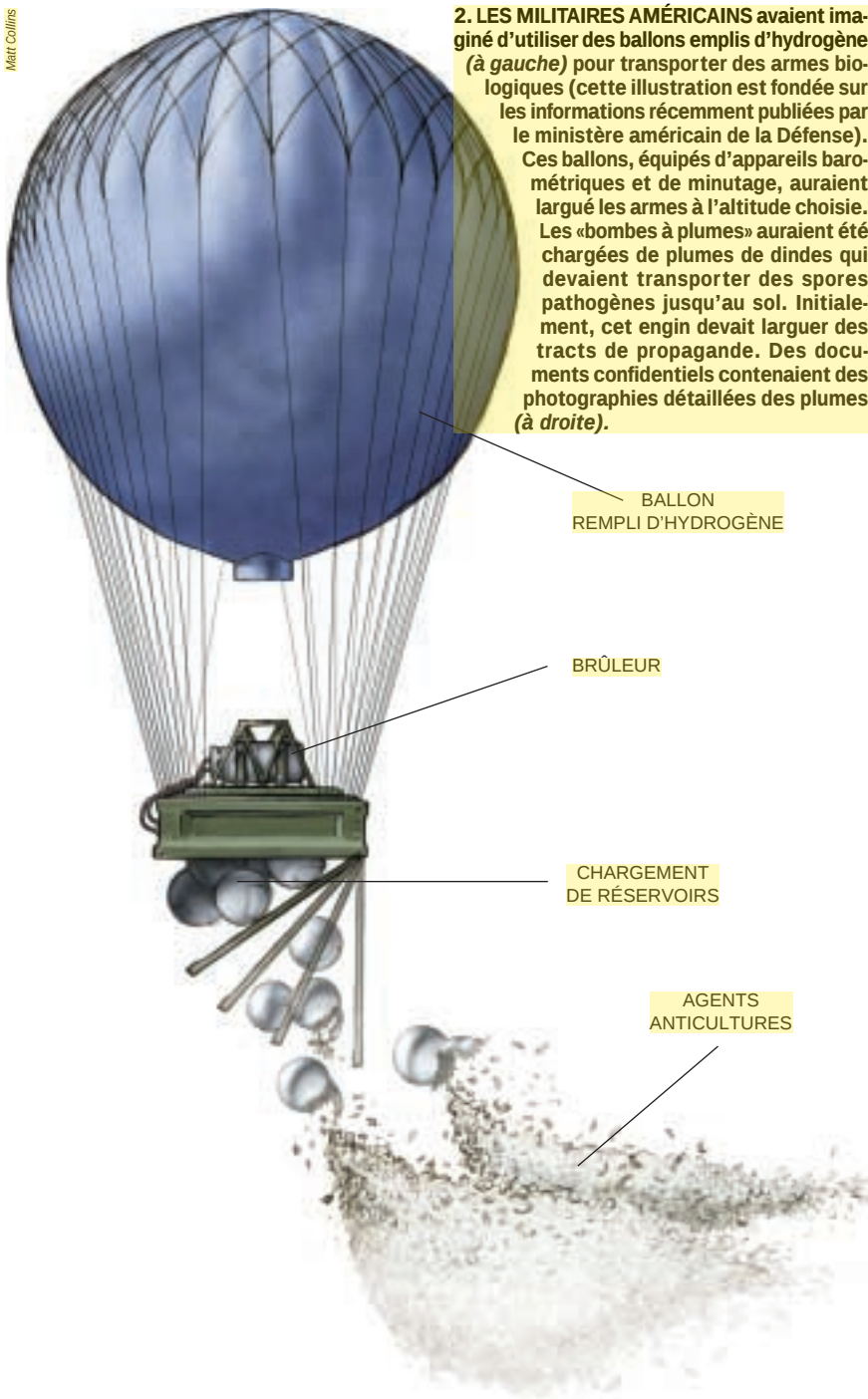
La guerre biologique est une menace internationale, car les pays dépourvus des compétences techniques pour produire des bombes atomiques peuvent toutefois fabriquer des armes qui déclencheraient des famines dévastatrices ou des crises économiques.

Les principales cultures vivrières ont de nombreuses variétés, dont chacune est adaptée à des conditions particulières de climat et de sol. Ces variétés ont des sensibilités différentes aux maladies. Les agents pathogènes des cultures existent aussi sous différentes formes, qui infectent les cultures et provoquent plus ou moins de dégâts selon les variétés cultivées. Un agresseur pourrait utiliser ces propriétés pour réaliser une arme spécifique : en isolant une souche d'agent pathogène qui n'attaquerait que les ressources principales de l'ennemi, il éviterait que les effets de l'arme ne se retournent contre lui.

Les exemples d'épidémies naturelles montrent que les dégâts seraient terribles. En 1970, l'helminthosporiose,



1. LES DÉFOLIANTS CHIMIQUES, tels ceux qui furent utilisés pendant la guerre du Vietnam, sont issus des programmes de recherche sur les armes biologiques contre les cultures vivrières.



une maladie due à un ver, a détruit pour six milliards de francs de blé dans le Sud des États-Unis. Dans le monde entier, des épidémies périodiques de rouille et de charbon des céréales coûtent des centaines de millions de francs. La rouille des feuilles du caféier, qui a détruit les plantations de café du Sud-Est asiatique au XIX^e siècle, dévasta l'Amérique latine depuis 20 ans.

De surcroît, une épidémie des cultures vivrières due à une attaque biologique ressemblerait à une épidémie naturelle, dissimulant l'agresseur et lui évitant des représailles. Un gouvernement ferait mieux admettre à sa population une attaque contre des plantes que la mort d'êtres humains. Pourtant, la destruction de cultures serait indirectement aussi redoutable que des armes biologiques contre les personnes. Par exemple, une attaque de charbon, qui infecterait et tuerait plusieurs centaines de milliers de personnes, semblerait plus grave que la destruction des récoltes, alors que l'anéantissement d'une culture stratégique, tel le riz dans un pays en développement, engendrerait une famine au moins aussi meurtrière. La famine serait aggravée par un affaiblissement immunitaire et par des maladies qui provoqueraient de terribles souffrances.

Contrairement aux armes classiques, les armes biologiques atteindraient les civils, ce qu'essaient d'éviter les règlements internationaux. Or, l'histoire montre que les maladies des cultures décimeraient les populations civiles. En Irlande, en 1845 et en 1846, le mildiou de la pomme de terre a tué un million de personnes et en a chassé un autre million. Au Bengale, en 1942 et en 1943, plus de deux millions de personnes sont mortes de faim à la suite d'une épidémie d'helminthosporiose du riz.

Les tentatives des pays occidentaux

Plusieurs pays industrialisés se sont intéressés à la guerre biologique, avant que la Convention de 1972 soit signée. Le programme français d'armement biologique, par exemple, a commencé en 1921. Vers la fin des années 1930, les militaires étudiaient deux ravageurs de la pomme de terre : le mildiou et le doryphore. Puis, pendant la Seconde Guerre mondiale, la Grande-Bretagne a concentré ses recherches sur le bacille du charbon ; les tests, sur l'île Gruinard, au large de l'Écosse, ont rendu



ce territoire inhabitable pendant près de 50 ans. En 1943, les militaires britanniques ont jugé que l'île Gruinard était trop proche du continent et ils ont préféré faire leurs essais dans la prairie de l'Alberta, au Canada. Dans les années 1950, ils ont également utilisé des herbicides chimiques, notamment pendant l'insurrection communiste en Malaisie.

L'Allemagne n'a pas été en reste. Une étude effectuée à la fin de la Seconde Guerre mondiale a révélé que les plans et les idées étudiés par les biologistes végétaux de l'armée allemande étaient nombreux. L'Angleterre et les États-Unis étaient particulièrement visés. L'Allemagne a notamment étudié le mildiou de la pomme de terre, la piriculariose du riz, les rouilles jaune et noire du blé, ainsi que des insectes nuisibles, tels le doryphore, le charançon du colza, un carabe du maïs et une guêpe du pin. En 1943, un vaste programme d'élevage de doryphores commençait ; les coléoptères étaient prêts en juin 1944, mais trop tard pour détruire les récoltes de pommes de terre britanniques de l'année.

Au Japon, pendant la Seconde Guerre mondiale, un programme d'armement biologique fut activement dirigé par la tristement célèbre Unité 731. Les membres de cette unité disséquaient des prisonniers vivants et mettaient au point des agents biologiques contre l'homme. Ils étudiaient également de nombreux agents pathogènes des végétaux, et des herbicides chimiques, qui pouvaient contaminer les cultures américaines et soviétiques,

en particulier celles du Nord-Ouest du Pacifique. Le champignon du charbon du blé et les nématodes parasites du blé semblaient les plus prometteurs. Une installation produisait annuellement plus de 90 kilogrammes de spores de rouille des céréales.

Les essais américains

Dès les années 1940 jusqu'à la décision de R. Nixon, en 1969, les États-Unis ont conservé un important programme de guerre biologique, avec des études approfondies d'armes anticultures. Grâce à la loi américaine sur la liberté de l'information, on a aujourd'hui accès aux documents naguère confidentiels qui décrivent ce programme. Julian Robinson, de l'Université du Sussex, a montré que les recherches sur les agents anticultures étaient suffisamment encourageantes pour continuer de financer l'ensemble du programme américain d'armement biologique, lorsqu'il a été interrompu en 1969. L'un d'entre nous (S. Whitby) a poursuivi le travail de J. Robinson et montré que le programme américain anticultures visait la pomme de terre, avec le mildiou, et le soja, la betterave à sucre, les patates douces et le coton, avec des sclérotinia (des champignons qui attaquent les racines de la plante). Le blé d'Ukraine, le grenier de l'ex-Union soviétique, et le riz chinois étaient les cibles principales du programme américain.

Entre 1951 et 1969, les États-Unis ont accumulé plus de 30 tonnes de spores de *Puccinia graminis tritici*, le champignon responsable de la rouille



3. DES PLANTS DE POMMES DE TERRE (à gauche) sont rapidement détruits par le mildiou (à droite). Même légèrement touchées par le mildiou (en bas à droite), les pommes de terre ont un goût désagréable. Cette maladie, qui provoqua une famine en Irlande, en 1845, est une arme biologique puissante.

noire du blé. Une telle quantité aurait suffi à contaminer le blé de toute la planète. Les spores du champignon restent viables pendant plus de deux ans lorsqu'elles sont stockées au frais, et le micro-organisme se propage rapidement quand il est lâché. Un seul grain de blé contaminé contient près de 12 millions de spores, qui peuvent chacune contaminer un plant. Contre le riz, les États-Unis avaient rassemblé, en 1966, une tonne de spores de la taille d'un grain de poussière du champignon *Piricularia oryzae*, responsable de la piriculariose.

Les armes américaines étaient diaboliques : une bombe d'environ 200 kilogrammes, initialement mise au point pour la dispersion de tracts de propagande, était emplie de plumes couvertes