

Cependant, la rotation de l'arbre moteur doit être ajustée, par un réducteur, à celle des roues. Cela se fait en général par des systèmes à deux étages de roues dentées. Compacts et moins volumineux que le moteur, ces réducteurs atteignent des rendements de plus de 90% grâce au petit nombre de pièces qui les composent.

On pourrait aussi construire des moteurs à rotation lente, entraînant directement les roues, mais ils auraient l'inconvénient d'une faible densité de puissance. À performances comparables, de tels entraînements directs devraient être plus volumineux, plus lourds et plus coûteux que des entraînements centraux à grande vitesse. Les grandes tailles de leurs composants auraient aussi l'inconvénient de réduire le rendement moteur à mesure que l'usure et le frottement augmenteraient. C'est pourquoi toutes les voitures électriques produites aujourd'hui fonctionnent avec des moteurs électriques rapides et une petite boîte de vitesses.

DES ENGRENAGES FIXES EN GÉNÉRAL

Certaines voitures électriques sont dotées de modificateurs de régimes, c'est-à-dire de plusieurs vitesses. C'est intéressant lorsqu'on souhaite combiner dans le même véhicule un couple de démarrage élevé avec une vitesse maximale élevée, ce qui est par exemple nécessaire dans les compétitions automobiles. Les engrenages nécessaires occupent trop de place et sont trop lourds, sans parler des pertes de puissance qu'ils occasionnent. Même le modèle S de Tesla, qui passe de 0 à 100 kilomètres par heure en 4,4 secondes et atteint une vitesse maximale de 225 kilomètres par heure, est livré avec des engrenages fixes.

Malgré les différences techniques entre les moteurs asynchrones, les moteurs synchrones à aimants permanents et les moteurs synchrones à excitation bobinée, les fonctionnements de tous ces dispositifs de propulsion électrique sont assez similaires.

Dans la plage des faibles nombres de tours par minute, donc des basses vitesses, les moteurs fonctionnent à flux magnétique constant, mais il faut ajouter de l'électronique pour le garantir. Dans le même temps, la quantité de chaleur évacuable et la puissance maximale du système de refroidissement limitent l'alimentation électrique totale possible. Le courant d'alimentation maximal et le flux magnétique sont donc constants dans la plage des basses vitesses, ainsi que le couple maximum atteignable (voir le diagramme page 71).

La puissance du moteur est égale au produit du couple par la vitesse de rotation. La puissance disponible augmente donc dans la plage des basses vitesses de 0 (à l'arrêt) jusqu'à un maximum, atteint pour la vitesse de

rotation maximale. La plupart du temps, elle correspond à des vitesses du véhicule comprises entre 40 et 60 kilomètres par heure, selon le type de moteur.

Au-delà de la vitesse maximale, on entre dans la plage des faibles champs. Le variateur – le composant qui dicte à chaque instant au moteur la fréquence de la tension alternative appropriée, exploite désormais toute la tension disponible aux bornes de la batterie. La fréquence augmente encore proportionnellement à la vitesse. Cependant, comme le flux magnétique varie comme le rapport tension/fréquence, il tend à diminuer. Le courant continu thermiquement admissible reste le même. Pour ces raisons, le couple diminue en raison inverse du nombre de tours par minute, tandis que la puissance mécanique disponible – produit du couple par la vitesse de rotation – reste constante.

Par ailleurs, la tension de la batterie diminue au fur et à mesure qu'elle se décharge. Les batteries typiques des véhicules produits en série aujourd'hui fournissent un maximum de 360 volts à pleine charge. La tension chute à 320 volts ou même à 300 volts lorsque la batterie est presque vide. Cela a un impact important sur le comportement du moteur. À tension plus basse, la plage de vitesses de base se termine à des vitesses plus basses, et la plage d'affaiblissement du champ commence plus tôt. La puissance maximale disponible diminue alors avec la tension disponible. Cette puissance disponible à plein régime s'affiche sur les tableaux de bord de certains véhicules électriques, telle la ZOE de Renault.

Au cours des deux dernières décennies, les ingénieurs ont exploité toutes ces possibilités de réglage du fonctionnement des systèmes de propulsion électrique afin de rendre les moteurs électriques suffisamment efficaces – en tout cas par rapport à leurs prédécesseurs industriels – pour être utilisés dans les voitures particulières. Des vitesses plus élevées, de meilleures solutions de refroidissement, des aimants plus puissants, une électronique moderne et la commande par ordinateur ont permis d'améliorer le rapport puissance/poids d'un facteur 10.

Les systèmes actuellement à l'essai dans les laboratoires et ceux développés pour la compétition suggèrent qu'une amélioration d'un autre ordre de grandeur sera possible. Par exemple, les semi-conducteurs en carbure de silicium devraient apporter bientôt de grandes améliorations aux électroniques de puissance, car ils résistent à des températures plus élevées, présentent de plus faibles pertes ainsi que des temps de commutation plus courts. À n'en pas douter, les systèmes de propulsion électrique de demain seront encore plus compacts et plus puissants. ■

BIBLIOGRAPHIE

M. Dopplebauer et P. Winzer, **A lighter motor for tomorrow's electric car**, *IEEE Spectrum*, vol. 54(7), pp. 26-31, 2017.

A. Hughes et B. Drury, **Electric Motors and Drives**, Newnes, 4^e édition, 2013.

R.-P. Bouchard et G. Olivier, **Conception de moteurs asynchrones triphasés**, Presses internationales Polytechnique, 1999.

J.-D. Chatelain, **Machines électriques**, Bordas, 1993.

Des chercheurs pris dans la guerre biologique

Que feriez-vous si le gouvernement vous demandait d'effectuer des recherches visant à défendre les populations contre des épidémies intentionnelles?

Au cours du xx^e siècle, nombre de chimistes et biologistes civils, confrontés à cette question, ont accepté de collaborer secrètement, même si cela signifiait souvent aussi développer et produire les armes biologiques à combattre.



En janvier dernier, le virologue David Evans et son équipe de l'université d'Alberta, au Canada, indiquaient, dans la revue *PLoS One*, qu'ils avaient réussi à produire, à petit budget, une variante du virus de la variole. Conçue sur la base de séquences d'ADN trouvées sur Internet – qui provenaient du virus responsable de la forme chevaline de la variole –, l'initiative visait à produire un vaccin plus efficace contre cette maladie. Six mois plus tôt, la revue *Science* mettait déjà en garde contre cette recherche, alors en cours, qui pouvait donner l'occasion à des terroristes de produire à peu de frais des armes biologiques.

De fait, depuis que la période de l'après-Guerre froide a sonné le glas de la bipolarité politique du monde, ce que l'on nomme aujourd'hui le bioterrorisme préoccupe les États, particulièrement depuis l'épisode dit des «lettres à l'anthrax», au cours duquel, en octobre 2001,

diverses institutions, dont des rédactions de journaux, avaient reçu des lettres contenant des bacilles de la maladie du charbon.

Certes, dès les premières décennies du xx^e siècle, les États qui en avaient les capacités s'étaient lancés dans une course aux armements biologique et chimique, mais de nos jours, un nouvel aspect est venu renforcer l'inquiétude des dirigeants à ce sujet : la crainte de voir émerger des capacités de destruction sortant du cadre étatique. Le très grand nombre de canulars et les tentatives avérées de bioterrorisme des trente dernières années – dont celles des sectes Rajneesh à The Dalles, dans l'Oregon, en 1984 et Aum à Kameido, au Japon, en 1993 –, conjointement avec la fin de la Guerre froide et l'avènement d'Internet, laissent penser que l'arme biologique, l'arme atomique du pauvre comme la surnomment souvent les militaires, représenterait une menace sans précédent.

Le fait qu'une revue scientifique alerte sur les risques bioterroristes liés à une étude montre

L'ESSENTIEL

> Dès le début du ^{xx}e siècle, la France a développé des armes biologiques grâce à l'expertise de chimistes et biologistes civils.

> Auguste Trillat, chef du service des recherches appliquées à l'hygiène à l'institut Pasteur, joua ainsi un rôle clé dans la création du programme français

d'armement biologique et chimique après la Première Guerre mondiale.

> Ces recherches, menées dans le plus grand secret, ont conduit à des essais en grandeur nature, notamment en Algérie.

L'AUTEUR



ETIENNE AUCOUTURIER
docteur en philosophie (université Paris-I), historien et philosophe des sciences et des techniques, enseignant en philosophie (académie de Versailles)



Dès la Première Guerre mondiale, des gaz toxiques faisaient couramment partie de l'arsenal de guerre, comme ici le phosgène ou dichlorure de carbonyle, que l'armée allemande a répandu pour couvrir son déplacement vers les tranchées britanniques, vers 1916. Les armes bactériologiques existaient aussi, mais étaient beaucoup moins utilisées.

> que le monde scientifique a fait siennes ces craintes. Mais cela n'a pas toujours été le cas. Si dès les années 1950, profondément marqués par l'emploi de la bombe atomique, les physiciens du domaine ont pris acte des enjeux éthiques et politiques de leurs recherches, pendant ce temps, les chimistes, biologistes et médecins concernés par l'usage militaire de leurs travaux ne dénonçaient que marginalement les recherches sur les armes biologiques et chimiques, sans doute à cause de leur caractère plus secret et des usages moins catastrophiques ou spectaculaires qui en étaient faits.

Pourtant, ces armes ont été développées et utilisées dès le début du xx^e siècle, soit bien avant l'arme nucléaire, et ce grâce à l'expertise scientifique et médicale de nombre d'entre eux. Un minutieux travail de recherche dans les archives militaires françaises, mais aussi dans d'autres fonds comme les archives de la direction de l'institut Pasteur, nous a en effet récemment permis de montrer que, en France, ces armes ont fait l'objet d'une collaboration continue des militaires avec des scientifiques et médecins civils, membres d'institutions de premier plan.

DU ROQUEFORT AUX NUAGES ARTIFICIELS

La France a été pionnière dans le domaine des armes biologiques et chimiques. Dès la première décennie du xx^e siècle, un chimiste français renommé, Auguste Trillat, inventeur du formol quelques années auparavant, brevetait certes un procédé de fabrication industrielle du roquefort, mais posait aussi les bases de la production intentionnelle d'épidémies à l'aide de nuages artificiels microbiens.

Bien avant la Première Guerre mondiale, le pays avait entrepris des recherches à visée militaire sur les armes chimiques. Mais c'est pendant cette guerre que les Français, puis les Allemands, firent pour la première fois usage de gaz de combat. Les armes dites biologiques furent elles aussi utilisées, mais de façon marginale, plutôt en tant que moyens de sabotage (pour tuer du bétail ou des animaux de transport) qu'en tant qu'armes de destruction massive, ou visant massivement les humains. Néanmoins, la menace de guerre bactériologique que ces attaques rendaient plus tangible fit avancer les recherches sur les méthodes de désinfection et de prophylaxie (l'ensemble des mesures à prendre pour prévenir les maladies). Trillat, devenu en 1905 chef du service des recherches appliquées à l'hygiène de l'institut Pasteur, à Paris, joua ainsi un rôle fondamental dans la création du programme français d'armement biologique et chimique après la Première Guerre mondiale.

En 1922, lui qui avait été pionnier tant dans la production de nuages artificiels déclencheurs



36. Poudrerie Militaire Nationale du Bouchet (S.-et-O.)
Bureaux – Bâtiments de l'ancienne Manufacture d'Armes
Logement du Sous-Agent technique

d'épidémies, pour lesquelles il avait étudié les conditions atmosphériques propices à leur développement, que dans la recherche de méthodes de désinfection chimique à grande échelle, fut sollicité pour donner les lignes directrices de ce nouveau programme, sous la forme d'un rapport commandé l'année précédente par le ministère de la Guerre. Dès lors s'installa une collaboration continue entre institutions de recherche civiles et militaires. Les recherches sur les armes chimiques et biologiques requérant des compétences et des équipements similaires, les institutions et chercheurs mobilisés travaillaient en commun sur les deux systèmes, qu'il s'agisse de la recherche, du développement ou de la production.

L'institut Pasteur, ainsi que de nombreuses institutions scientifiques et médicales françaises de premier plan, dont le Muséum national d'histoire naturelle et le Collège de France, participèrent à ce programme par l'intermédiaire de certains de leurs membres éminents, comme les chimistes Charles Moureu (Collège de France), Marcel Delépine (faculté de pharmacie) et André Job (Conservatoire national des arts et métiers), travaillant sous contrats secrets avec la sphère militaire.

Dans le monde, la crainte que les guerres du futur voient s'amplifier le caractère de guerre totale qu'avait pris la Grande Guerre conduisit les principales nations occidentales, mais aussi le Japon, à préparer en temps de paix, dès l'entre-deux-guerres, les moyens de défendre – et d'attaquer – non plus seulement les combattants, mais les populations de nations entières. À cette même époque, des rumeurs issues de la presse britannique sur des essais secrets de dispersion d'agents biologiques effectués par des agents secrets allemands dans le métro parisien achevèrent de convaincre

LA POUDRERIE DU BOUCHET

Dès les années 1920 (et encore aujourd'hui), la poudrerie du Bouchet, dans le sud de Paris, fut un des principaux centres de recherche sur les armes biologiques. Dans les années 1960, par exemple, le Centre d'études du Bouchet avait pour attributions l'étude de la contamination par terrains et par aérosols, la lyophilisation de toxines, les études d'armement (production d'aérosols microbiens ou d'agents incapacitants, étude de solutions microbiennes...), la détection et la protection.

ARMES CHIMIQUES ET ARMES « BIO »

Aujourd'hui, la terminologie militaire établit une distinction entre les armes chimiques et les armes biologiques, fondée sur les substances utilisées. Cette distinction à des visées juridiques et tactiques. Les deux types d'armes ne sont pas interdits de la même manière ni depuis la même époque, et leur usage diffère. Pourtant, ils n'ont pas toujours été dissociés.

Parmi les textes de loi emblématiques à ce sujet, au milieu du XIX^e siècle, pendant la guerre de Sécession, fut adopté le code *Lieber* (1863) qui interdit, entre autres pratiques cruelles, l'usage de poisons dans la guerre. Mais à l'issue de la Première Guerre mondiale, une légère nuance est apparue dans le *Protocole de Genève* (1925) : il spécifia qu'il était interdit

d'utiliser des gaz asphyxiants, toxiques ou similaires et des moyens bactériologiques. Cette dissociation juridique en germe devint effective dans la seconde moitié du XX^e siècle, avec la signature en 1972 de la *Convention sur l'interdiction de la mise au point, de la fabrication et du stockage des armes bactériologiques (biologiques) ou à toxines et sur leur destruction*. Les armes chimiques sont ainsi demeurées sans interdiction spécifique autre que celle du *Protocole de Genève* jusqu'en 1993, lorsque la *Convention sur l'interdiction de la mise au point, de la fabrication, du stockage et de l'usage des armes chimiques et sur leur destruction* fut adoptée.

Qu'est-ce qui distingue fondamentalement ces deux types d'armes ? Les toxines biologiques (la ricine, par exemple) étant fonctionnellement équivalentes à des armes chimiques, la distinction juridique est faite en vertu de leur origine. Les toxines biologiques sont ainsi qualifiées de biologiques en ce qu'elles ne sont pas des produits de la synthèse chimique, mais sont trouvées telles quelles dans la nature. Elles sont issues du vivant. Il en est de même des autres agents biologiques : bactéries, virus, champignons, et autres agents pathogènes non synthétiques sont inclus dans la catégorie des armes de guerre biologique. D'un point de vue juridique, les armes biologiques sont donc comparables... aux produits alimentaires dits « issus de l'agriculture biologique ». En revanche, toute reproduction de toxine biologique par chimie de synthèse relève du droit des armes chimiques...

Ainsi, la subdivision juridique des poisons prévus pour un usage guerrier est discutable à bien des égards. Elle a vraisemblablement eu pour fonction de permettre aux États concernés, dans la seconde moitié du XX^e siècle, de poursuivre des recherches, développements et productions d'armes chimiques en toute liberté.

E. A.

l'opinion publique et l'État français de la nécessité de prendre au sérieux cette menace. La réorganisation de la France en nation armée, souhaitée au plus haut niveau de l'État, conduisit à la production de moyens offensifs et défensifs de guerre chimique, biologique, puis, après la Seconde Guerre mondiale, nucléaire.

L'ACTIVITÉ SECRÈTE DE LA POUDRERIE DU BOUCHET

La poudrerie du Bouchet, à Vert-le-Petit, au sud de Paris dans l'actuelle Essonne, devint graduellement le centre névralgique d'un réseau de recherche et développement d'armes biologiques et chimiques, incluant d'autres institutions civiles et militaires. Elle demeure de nos jours, sous le nom de Centre d'études du Bouchet, le centre du ministère des Armées dédié à la défense contre les menaces biologiques et chimiques, et l'un des rares sites en France (et dans le monde) à disposer d'un laboratoire de niveau de sécurité P4. Peu à peu, la France rassembla ainsi secrètement, sous l'appellation d'armes spéciales, un arsenal de nouveaux moyens offensifs et défensifs, étudiés et développés avec l'apport constant de l'expertise scientifique et médicale civile.

En 1947, une Commission médicale de défense contre la guerre moderne vit le jour afin de mieux centraliser les études relatives aux armes spéciales, de reconstruire une défense nationale incluant ces armes et de tirer parti des recherches scientifiques civiles ainsi que des renseignements issus des réseaux scientifiques internationaux de chercheurs. Mixte, cette commission était composée de militaires et de savants de premier plan, pour beaucoup médecins des facultés de médecine ou chercheurs de l'institut Pasteur. Entre autres membres, Léon Binet, doyen de la faculté de médecine de Paris, Robert Debré, président de l'Institut national d'hygiène, ou Jacques Tréfouël, directeur de l'institut Pasteur, prenaient part aux discussions secrètes de la commission et répondaient secrètement à diverses commandes militaires. Les laboratoires civils entreprirent ainsi une grande diversité d'études sur, par exemple, le mode d'action des trilons (les gaz neurotoxiques Sarin, Tabun et Soman), la possibilité de vacciner contre la radioactivité ou encore celle de potentialiser les effets délétères d'aérosols de bacilles du charbon en les combinant avec des métaux lourds.

Les décennies suivantes, l'ouverture à la sphère civile des recherches sur les armes spéciales se referma partiellement, le gouvernement préférant concentrer ses forces sur l'arme nucléaire. Mais de nombreux chercheurs continuèrent de travailler sur financement militaire, à des fins prophylactiques ou non, leur expertise demeurant indispensable, s'agissant par exemple des études sur la polyvaccination. ➤

> À titre indicatif, en 1967, le nombre d'animaux de laboratoire destinés en France à l'expérimentation d'agents chimiques et biologiques de guerre (20 000 souris, 20 000 rats, 5 000 cobayes, 2 000 lapins et 50 singes) représentait 10 % de l'utilisation actuelle par an d'animaux à des fins scientifiques.

Outre la motivation patriotique mise en avant par certains scientifiques pour justifier leur collaboration à ces programmes, la relation mutuellement bénéficiaire entre l'armée et les hommes de science en France explique sa pérennité. Ainsi, en 1972, Jacques Monod, alors directeur de l'institut Pasteur, écrivait au ministre de la Défense nationale Michel Debré qu'il serait souhaitable de renforcer et formaliser les liens entre l'armée et l'institut Pasteur, qui formait alors selon lui « la quasi-totalité des médecins-biologistes de l'armée ».

DES ESSAIS MYSTÉRIEUX EN ALGÉRIE

Les armes testées au moins depuis les années 1930 à l'ouest du Sahara algérien (ainsi que dans certains centres d'expérimentation métropolitains, notamment près de Bourges) continuèrent de l'être jusqu'à la fin des années 1970. Notamment, on fit exploser des obus, roquettes et grenades chargés en agents biologiques ou chimiques pour mesurer leurs effets en situation réelle. La nature exacte et l'étendue des essais effectués secrètement en Algérie dans les deux décennies qui suivirent les accords d'Évian (1962) demeurent à ce jour peu connues et font donc régulièrement l'objet de spéculations légitimes de la part des populations concernées, craignant que les sites n'aient pas été parfaitement dépollués. Néanmoins ces essais ont eu lieu et ont participé de l'expertise française dans le domaine des armes chimiques et biologiques.

Ainsi, de l'aube du xx^e siècle au début des années 1970, la France a développé et produit, à des échelles variables selon les époques et les priorités politico-militaires, des poisons synthétiques ou non, destinés, d'une part, à être utilisés en temps de guerre contre les hommes, les animaux et les plantes, mais aussi, d'autre part, à tester leurs effets à grande échelle pour mieux s'en prémunir en situation opérationnelle.

Les autres nations développées n'ont pas été en reste au cours du xx^e siècle. Le Royaume-Uni, le Japon, les États-Unis, l'URSS, le Canada, les Pays-Bas, Israël, l'Afrique du Sud et d'autres ont aussi eu, à des fins diverses et des échelles variables, leur programme de guerre biologique et chimique. Le Japon, lorsqu'il occupait la Mandchourie avant la Seconde Guerre mondiale, a par exemple effectué de cruels essais sur les populations chinoises locales. Les États-Unis ont, à l'issue de cette guerre, secrètement récupéré les données que les Japonais avaient récoltées. Et,

LES NUAGES ARTIFICIELS D'AUGUSTE TRILLAT

« Il fit cette découverte curieuse que les microbes en suspension dans l'atmosphère deviennent des noyaux de condensation de gouttelettes qui restent en suspension plus ou moins longtemps, se multiplient dans certains gaz tels que l'air des égouts, sont entraînés par les courants ou par les mouvements giratoires, se rassemblent et peuvent, dans des conditions de pression ou de dépression atmosphérique précisées par lui, se déposer sur les viandes ou sur d'autres substances alimentaires et en déterminer la putréfaction. »

M. Trillat a pu établir ainsi les relations qui existent entre la marche des épidémies et les influences météorologiques. Il a réalisé expérimentalement la transmission à distance de certaines épidémies aux animaux en faisant varier l'action du froid, de la pression barométrique et de l'électricité. Tout récemment il a étendu ces expériences, par de très ingénieux dispositifs, à la production de nuages artificiels chargés de substances curatives pour produire chez ces derniers les réactions d'immunité.

[...] Enfin, pendant la guerre, M. Trillat a collaboré très utilement à la défense nationale, notamment par ses recherches sur la production de nuages artificiels qui ont été largement utilisés par les marines et les armées alliées, tant pour la protection des navires contre les attaques des sous-marins allemands que pour cacher à l'ennemi les mouvements des troupes. »

Rapport sur la candidature de M. Trillat
[à l'Académie de médecine],
Archives de l'institut Pasteur, 1937

dans le cadre de la Guerre froide, l'URSS serait aussi entrée en lice avec son ambitieux programme *Biopreparat*, selon des transfuges russes tels que Ken Alibek ou Vladimir Pasechnik.

Parmi les scientifiques, mais aussi les militaires, il semble qu'un consensus ait perduré quant à la nécessité de maintenir une forme de politique de santé publique secrète pour défendre les populations contre les armes biologiques et chimiques. En France comme ailleurs, cependant, cette dimension avouable de leur action était contrebalancée par une contribution simultanée à des programmes souvent offensifs. Cette forme de politique de « santé publique inversée » – selon l'expression d'un de ses critiques de la fin des années 1960, le Britannique Robin Clarke – a placé les scientifiques et médecins devant un dilemme moral : collaborer secrètement avec les armées de leur pays pour prémunir des populations civiles contre des épidémies intentionnelles, au risque de contribuer en même temps à les doter de moyens offensifs en pratiquant des recherches non divulguées sur des agents pathogènes naturels ou synthétiques. Il semblait ainsi irresponsable de refuser cette collaboration autant qu'il l'était de l'accepter, et tout aussi irresponsable de publier les résultats des recherches comme de ne pas les publier. La réponse récurrente des scientifiques à ce dilemme, en France au moins, a majoritairement consisté à jouer le jeu du secret.

SUR LE WEB

Un site très détaillé consacré aux recherches à visée militaire sur les armes chimiques
guerredesgaz.fr

Wild Wild Country (2018)
Une série documentaire sur la secte de Rajneesh et l'attaque bioterroriste qu'elle commit aux États-Unis en 1984
<https://bit.ly/2M4Bbil>



De même, rares ont été les avocats de l'usage des sciences biomédicales pour la guerre. Si quelques scientifiques comme le généticien britannique John Burdon Sanderson Haldane, dans les années 1920, ou des militaires tels que le brigadier général Jacquard Hirshorn Rothschild, après la Seconde Guerre mondiale, ont entrevu dans l'utilisation des connaissances en physiologie un moyen de rendre la guerre plus humaine (en introduisant la possibilité d'utiliser des agents non létaux plutôt que des armes conventionnelles aux effets moins prévisibles, comme les explosifs), la sélection précise des effets physiologiques des armes est demeurée une inclusion contre-nature de la science et de la médecine dans la guerre (tandis que des armes conventionnelles aux effets moins prévisibles sont restées autorisées).

Aujourd'hui, les armes biologiques et chimiques continuent de faire l'objet d'un dilemme moral récurrent pour la biomédecine. On ne s'improvise pas savant militaire: les chercheurs se lancent rarement dans une carrière médicale ou scientifique en vue de produire des systèmes d'arme ou de prémunir les populations nationales contre des armes biologiques et chimiques. Aussi la sphère militaire a-t-elle toujours besoin de l'expertise de chercheurs civils et continue-t-elle, selon les périodes, à les inclure secrètement dans des programmes militaires ou à financer des travaux d'intérêt militaire.

La responsabilité des chercheurs civils est d'autant plus grande que sans expertise physiologique, la distinction entre les agents chimiques ou biologiques bénins et malins est impossible. La connaissance précise du fonctionnement du corps (humain, mais aussi d'autres animaux ou de végétaux) et de ses

Cette photographie remonte à 1916, mais même en temps de paix, en France, pendant des années, des terrains sans habitants, notamment près de Bourges, ont servi de lieux d'expérimentation d'armes chimiques et biologiques.

BIBLIOGRAPHIE

E. Aucouturier, **La Guerre biologique. Aventures françaises**, Matériologiques, 2017.

E. Aucouturier, **Biological Warfare. Chemical Warfare and the Public Body**, dans A. Mankoo et B. Rappert, **Chemical Bodies: The Techno-Politics of Control**, Rowman & Littlefield International, 2018.

J. Guillemin, **Hidden Atrocities: Japanese Germ Warfare and American Obstruction of Justice at the Tokyo Trial**, Columbia University Press, 2017.

J. Guillemin, **Biological weapons: from the invention of state-sponsored programs to contemporary bioterrorism**, Columbia University Press, 2005.

P. Binder, **Les Armes biologiques**, PUF, 2001.

interactions avec des substances ou agents exogènes est essentielle pour caractériser une substance ou un agent comme un poison. À tel point que les armes biologiques et chimiques devraient être rassemblées sous un même terme, «armes physiologiques», qui insisterait plus sur la sélectivité de leurs effets que sur le moyen utilisé pour les obtenir.

ET DEMAIN ?

Sauf à adopter une anthropologie optimiste fondée sur une confiance universelle, il semble difficilement pensable qu'un État soucieux de la sécurité de sa population et du droit humanitaire international ne cherche pas à mobiliser ses scientifiques en vue de secrètement préparer sa défense, donc en effectuant des recherches sur un maximum d'agents malins et sur leurs antidotes. Il résulte de cette tension entre la vocation universaliste de la science et les circonstances politiques qu'il reste difficile de nos jours de distinguer les recherches à vocation défensive de celles à vocation offensive: se défendre contre des poisons implique en effet d'en disposer afin de trouver des antidotes. Et par conséquent d'anticiper les menaces en maintenant une recherche biomédicale et militaire de pointe. Si le cadre législatif international tend à préserver un *statu quo* entre les États, comme c'est le cas de la dissuasion nucléaire, le cadre géopolitique de l'après-Guerre froide tend quant à lui à laisser planer la menace d'une utilisation moins prévisible ou identifiable de ces armes empoisonnantes par des groupes privés ou non étatiques.

Cela d'autant que les avancées scientifiques et techniques des dernières décennies – notamment Internet, les nanotechnologies et l'utilisation des *big data* en médecine – sont susceptibles de conférer à des États comme à des entités privées des moyens de guerre biologique sans précédent, en accroissant la possibilité de sélectionner précisément les effets physiologiques ainsi que les éventuelles populations cibles.

Par exemple, nombre d'hôpitaux sont aujourd'hui dotés de biobanques où sont stockées et parfois partagées à grande échelle les données de patients consentants (notamment génétiques) et leurs échantillons biomédicaux. Ces biobanques constituent une avancée considérable pour la recherche biomédicale. Néanmoins, elles présentent aussi le risque qu'à la faveur d'une instabilité politique d'un État y ayant accès ou d'une privatisation de leur gestion (que l'OCDE préconise depuis 2001), le rêve d'un partage global des progrès de la biomédecine ne se transforme en un cauchemar militaro-industriel. Il est donc plus que jamais nécessaire que les citoyens s'emparent de la question de la guerre biologique, dont les enjeux relèvent tant de la sécurité militaire que des sécurités sanitaire et alimentaire. ■

R

ENDEZ-VOUS

P.80 Logique & calcul
P.86 Art & science
P.88 Idées de physique
P.92 Chroniques de l'évolution
P.96 Science & gastronomie
P.98 À picorer

L'ART ET LA SCIENCE DES MOTS DE PASSE

Choisir les mots de passe, les garder en les protégeant, réussir à les dévoiler: la science des mots de passe est un trésor de subtilités.

L'AUTEUR



JEAN-PAUL DELAHAYE
professeur émérite
à l'université de Lille
et chercheur au Centre
de recherche en
informatique, signal
et automatique de Lille
(Cristal)



Jean-Paul Delahaye a récemment publié: **Les Mathématiciens se plient au jeu**, une sélection de ses chroniques parues dans *Pour la Science* (Belin, 2017).

Nous utilisons tous des mots de passe pour protéger nos comptes, notre messagerie électronique, nos accès à des sites particuliers, nos ordinateurs, téléphones, etc.

Souvent, quand nous choisissons un mot de passe, le système le refuse en nous indiquant que notre choix est trop simple et cela nous agace. Parmi les conseils donnés, il y a celui de ne pas écrire les mots de passe sur un papier à côté de l'ordinateur. Il faut aussi renoncer à utiliser le même mot de passe sur plusieurs sites internet, en changer régulièrement et... ne pas l'oublier.

Pour bien comprendre tout cela, un peu de bon sens suffit-il? Que nenni! Savez-vous pourquoi 6 caractères ne sont pas assez pour un bon mot de passe et pourquoi il ne faut pas utiliser que des minuscules? Savez-vous qu'il existe des méthodes permettant de stocker indirectement des mots de passe sur un serveur informatique qui, même s'il est visité par un hacker, empêcheront celui-ci de tirer profit de ce qu'il trouve? Savez-vous qu'entre «faire beaucoup de calculs» et «memoriser beaucoup de données», on peut trouver des compromis et ainsi réussir à casser des mots de passe sinon inaccessibles? Comprendre tout cela sera notre but.

Quand on vous demande un mot de passe, il se situe dans un certain espace de possibilités dont il faut avoir conscience de la taille. Si l'on

choisit 6 lettres minuscules pour son mot de passe, par exemple «afzjxd», «tonton», «secret», «wwwwww», l'espace comporte $26^6 = 308915776$ possibilités. Il y a en effet 26 choix possibles pour la première lettre, 26 choix possibles pour la deuxième, etc. Ces choix sont indépendants, on ne vous impose pas que toutes les lettres soient différentes, et donc la taille de l'espace des mots de passe est le produit des possibilités, ce qui donne $26 \times 26 \times 26 \times 26 \times 26 \times 26 = 26^6$.

DE LA COMBINATOIRE

Si vous choisissez un mot de passe de 12 caractères pris parmi les majuscules, les minuscules, les 10 chiffres et les 10 symboles & é \$? ç ù œ / + =, il y a 72 possibilités pour chacun des 10 signes du mot; l'espace des possibilités a alors pour taille 72^{12} , soit:

$$19408409961765342806016 \approx 19 \times 10^{21}.$$

C'est plus de 62000 milliards de fois plus que la taille du premier espace. Envisager un à un tous les mots de passe du second espace prendra 62000 milliards de fois plus de temps. S'il fallait à votre ordinateur une seconde pour visiter le premier espace, il lui faudrait deux millions d'années pour examiner chacun des mots de passe du second espace: la multiplication des possibilités a rendu impraticables certaines opérations envisageables sur le premier espace.

Pour mesurer la taille de ces espaces, il est courant de compter le nombre de chiffres binaires