



dans les escargots aquatiques microscopiques, qui provoquent la bilharziose chez l'homme. Ces dernières décennies, les altérations des zones d'habitat ont aussi favorisé l'expansion de maladies dues aux hantavirus ou au virus *Ebola* (responsables de fièvres hémorragiques), au virus du Nil occidental, à la dengue et au VIH.

L'altération des zones d'habitat

Nous avons récemment mis en évidence une correspondance entre l'altération des zones d'habitat par l'homme et les sites où les parasites *Ribeiroia ondatrae* abondent : lors de notre campagne de surveillance dans l'Ouest américain, nous avons découvert que 44 des 59 sites humides dans lesquels les amphibiens étaient infectés par le parasite étaient des réservoirs, des étangs associés à des fermes ou autres plans d'eau artificiels. L'épandage d'engrais et l'abondance du fumier provenant des troupeaux élevés aux alentours de ces habitats favorisent souvent la prolifération des algues, entraînant la prolifération des escargots qui les mangent et qui hébergent les parasites *Ribeiroia ondatrae*, de sorte que les effectifs de gre-

nouilles difformes augmentent. Enfin, les échassiers, qui sont l'autre type d'hôte indispensable à ces parasites, sont en général présents en abondance dans ces zones aménagées par l'homme.

Bien que le parasitisme exercé par les trématodes soit l'explication la plus vraisemblable de la plupart des difformités observées chez les amphibiens, ce n'est pas l'unique cause. Parfois, la pollution de l'eau ou une exposition excessive aux rayonnements ultraviolets provoqueraient aussi des anomalies morphologiques, de l'œil ou de la peau, notamment. Parfois, ils affaiblissent le système immunitaire des amphibiens, ce qui les rend plus vulnérables à l'invasion des parasites. Enfin, les prédateurs des amphibiens, tels les poissons, les sangsues ou les tortues, qui peuvent arracher des pattes aux têtards causent aussi des difformités.

Ainsi, les amphibiens sont exposés à plusieurs facteurs de risques. Les spécialistes devront démêler l'influence de chacun de ces facteurs et comprendre leurs interactions. Les facteurs qui perturbent le développement des grenouilles et qui augmentent leur mortalité pourraient un jour menacer d'autres animaux, voire l'homme. Nous devons y prendre garde.

Andrew BLAUSTEIN est professeur de géologie à l'Université d'Oregon. Pieter JOHNSON est écologue à l'Université Madison du Wisconsin.

Pieter JOHNSON, Kevin LUNDE, Euan RITCHIE et Alan LAUNER, *The Effect of Trematode Infection on Amphibian Limb Development and Survivorship*, in *Science*,

vol. 284, pp. 802-804, 30 avril 1999.

William SOUDER, *A Plague of Frogs*, Hyperion Press, 2000.

Ecosystem, Evolution and UV Radiation, sous la direction de Charles Cockell et Andrew Blaustein, Springer-Verlag, 2001.

www.npwrc.usgs.gov/narcam

Résilience



Mithridate, ici représenté dans la tragédie de Corneille, serait le Saint Patron de la résilience : il absorbait du poison pour s'y habituer et s'en immuniser.

Qu'est-ce que la résilience ? En mécanique, la résilience est une mesure de la résistance aux chocs des matériaux, leur capacité de supporter les coups.

Son origine est le verbe latin *resilio*, signifiant sauter en arrière, rebondir, rejallir. Cette origine contient en germe un enrichissement du concept : la définition du terme s'est élargie. Pour Boris Cyrulnik, subir et vaincre les coups du sort enrichissent la personnalité et la préparent à d'autres adversités.

Dans la littérature, cet « entraînement au malheur » est illustré par l'entrée dans la vie des adolescents blessés par leur enfance. Si le roman est le miroir que l'écrivain transporte tout au long du chemin de la vie, ce miroir reflète, dans la diversité, la nécessité quasi physiologique de surmonter des épreuves. *Olivier Twist* de Dickens, *Cosette* de Victor Hugo, *L'enfant* de Jules Vallès et *Brasse-Bouillon* d'Hervé Bazin, sont des exemples, parmi tant d'autres, du passage douloureux par ce chemin initiatique.

Il n'est pas jusqu'à Albert Einstein, qui ne dut subir les brimades des échecs aux examens et les refus de postes universitaires. Modeste examinateur de

brevets à Berne, il tira toutefois parti de son isolement pour développer son indépendance d'esprit et publier les articles qui changèrent la face du monde physique. Aujourd'hui, la résilience, c'est la capacité pour un objet (organe, individu, écosystème) de revenir – plus ou moins vite – à son état initial après une perturbation (au sens large) due à son environnement.

Dans les Sciences humaines, la résilience est élargie à la capacité de tirer parti des coups du sort. Elle se construit dans l'interaction entre un individu et la collectivité. En biologie, la vaccination est un exemple de résilience acquise.

Pour éclairer notre propos, nous allons examiner le concept de résilience dans de multiples contextes scientifiques pour en éclairer différentes facettes : par exemple, l'apparente fragilisation d'un message mathématique, l'imperfection nécessaire d'une technologie pour éviter des phénomènes périodiques et dangereux, les mutations favorables qui font que les espèces évoluent lors d'un changement de l'environnement, de la récupération de la végétation d'un écosystème, comme une forêt après une tempête. La résilience est la figure de style exprimant la résistance acquise suite à l'entraînement au mal.



Ramollir les aciers pour augmenter leur **résilience** : les phénomènes de trempe et de recuit

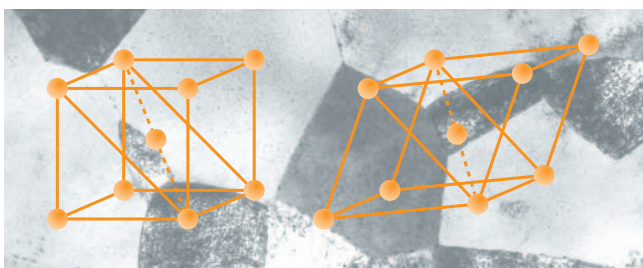
Pour durcir leurs épées, les métallurgistes de Damas savaient, au Moyen Âge, qu'il était favorable de les «recuire». Le recuit et la trempe, deux techniques proches, consistent à **porter le métal à une température où il se ramollit**, plus précisément où il change de constitution cristallographique, **puis à le refroidir pour qu'il prenne une conformation plus dure**. La légende raconte qu'après avoir chauffé leurs épées en acier, les forgerons de Damas les plongeaient dans le ventre d'esclaves pour les refroidir...

La structure obtenue par la trempe soudaine et, par conséquent, les caractéristiques mécaniques de l'acier,

sont nettement différentes de celles de l'état d'équilibre résultant d'un refroidissement lent.

Cette technique de recuit est également utilisée en informatique : pour trouver le chemin de longueur minimale reliant plusieurs centaines de points, par exemple la tournée d'un voyageur de commerce, on perturbe un chemin obtenu en augmentant la longueur de certains trajets, puis on recalcule à partir de cette nouvelle configuration un chemin total de longueur inférieure. On obtient ainsi une longueur de chemin que l'on compare à celle dont on est parti. Si elle est inférieure, on recommence la procédure à partir de ce chemin. **Là aussi, on désorganise le système pour l'améliorer.**

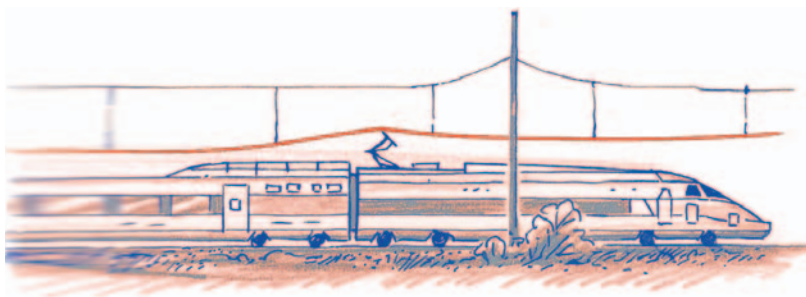
Résiliences



Les alliages à mémoire de formes plient, mais ne rompent pas

Découverts dans les années 1960, les alliages à mémoire de forme, par exemple, ceux de nickel et de titane, ont **une résilience intrinsèque**. Ils se déforment réversiblement sous le seul effet de la température. Leur secret consiste en une transition de phase de la maille cristalline, qui passe d'une forme cubique, dite austénitique, à une autre parallélépipédique, dite martensitique, quand la température diminue. **C'est la première forme qui est mémorisée**. Toute transformation mécanique de l'alliage sous sa forme martensitique est réversible : il suffit de le chauffer pour que ses cristaux reprennent leur forme initiale cubique. Plus encore, cette transition

de phase dote les alliages de propriétés de superélasticité, c'est-à-dire qu'ils supportent de façon réversible des déformations mécaniques importantes, de l'ordre de cinq pour cent. La contrainte appliquée est répartie dans la transformation des cristaux cubiques : **l'alliage ne rompt pas**. Enfin, lorsqu'on imprime à un de ces alliages en phase martensitique une forme donnée que l'on maintient pendant 20 ou 30 cycles de chauffage et de refroidissement, on oriente les défauts cristallins : la forme martensitique est alors aussi mémorisée. Au final, grâce à leurs multiples propriétés, les alliages à mémoire «se relèvent indemnes» des diverses contraintes que l'on peut leur infliger.



Une petite imperfection renforce la résistance d'un dispositif mécanique

Au Japon, les caténaires vendues par les industriels français s'usaient très vite, beaucoup plus vite qu'en France. D'où venait la résilience des caténaires françaises? Les experts étaient perplexes, jusqu'au jour où l'un d'entre eux observa la pose des pylônes portant les fils le long des rails. Le mystère s'expliqua alors par le perfectionnisme des ouvriers japonais. En France, les pylônes étaient posés avec un certain laxisme, distants d'environ cent mètres. Au Japon, cette distance était exactement mesurée. Du fait de cette régularité, un système d'ondes stationnaires de grande amplitude s'établissait et le frottement résultant

des déplacements du câble conducteur usait beaucoup les caténaires. Le défaut du dispositif était sa perfection, la solution du problème, un petit dérèglement qui empêchait l'établissement des ondes stationnaires.

La régularité temporelle peut être aussi néfaste que la régularité spatiale. On sait que les troupes ne doivent pas défiler au pas sur des ponts, sinon les vibrations induites par les chocs périodiques et simultanés risquent de le faire s'écrouler. Le pont d'Angers se serait écroulé à cause de cette synchronisation intempestive de la marche d'un régiment. La résilience est meilleure avec la désynchronisation, il faut mettre de l'imperfection pour augmenter la résilience.

Résilience

MESSAGES INDIVIDUELS	MESSAGES + CODES	MESSAGES TRANSMIS
00	000	000 BON 011 BON
01	011	001 MAUVAIS 101 BON
10	101	010 MAUVAIS 110 BON
11	110	100 MAUVAIS 111 MAUVAIS

Une fragilisation du système élimine les risques d'erreur

Le mathématicien Hamming devait faire ses calculs sur un des premiers ordinateurs... et comme il travaillait pendant le week-end, toute erreur de transmission de ses données était fatale : elle mettait l'ordinateur en panne et Hamming devait attendre le retour de l'équipe de maintenance. Comment améliorer la transmission? Il eut l'idée de dépister les erreurs en allongeant la longueur de ses messages en chiffres binaires (constitués d'une série de 0 et de 1).

Cette action est paradoxale, car l'erreur de transmission sur chaque lettre étant constante, plus le message est long, plus il y a de risques qu'un chiffre soit erroné. Ce que Hamming avait découvert, c'est qu'en ajoutant

un bit dit «de parité» à son message, il pouvait détecter une erreur de transmission. Pour un message de deux chiffres binaires, qui peut être 00, 01, 10, 11, Hamming ajoute un troisième chiffre égal à la parité du nombre de zéros (0 quand le nombre de zéros est pair ou nul, 1 quand ce nombre est impair) et obtient 000, 011, 101 et 110. Seuls les nombres appartenant à cette liste sont bons, c'est-à-dire permis. S'il y a une erreur de transmission, par exemple si 01 se transforme en 11, le chiffre transmis sera 111 et comme il ne fait pas partie de la bonne liste, il dénotera une erreur de transmission : grâce au bit supplémentaire redondant, Hamming pouvait vérifier son message pour qu'il ne bloque pas la machine et augmentait ainsi la résilience.



Des mini crashes éviteraient, en Bourse, les catastrophes

Si la bourse continue à éternuer, le monde économique pourrait attraper une grave bronchite. Pour augmenter la **résilience des marchés**, c'est-à-dire leur capacité à résister aux chocs, Michael Hart et ses collègues de l'Université d'Oxford suggèrent d'«immuniser» les actions boursières en déclenchant de petites attaques contre l'action. Ces ventes «tests» éviteraient les catastrophes majeures des jours noirs où tout le monde veut vendre et personne ne veut acheter. **Une simulation informatique des marchés a été conduite.**

Pour simuler la diversité des opérateurs, les décisions d'achat et de vente se faisaient sur des bases

probabilistes, reproduisant ainsi les caractéristiques de la réalité boursière. Ces simulations ont montré que les baisses importantes d'un titre étaient précédées de petites fluctuations à la hausse. **Au contraire, quand des valeurs étaient soumises à de petites diminutions, elles ne s'écroulaient que rarement.** Aussi pourrait-on, pensent les chercheurs, déceler sur le marché les signes avant-coureurs des catastrophes brutales. Dès l'apparition des signes prémonitoires, des paquets de valeurs seraient mis sur le marché, amenant les actions à leur niveau d'équilibre plus résilient. Toutefois, qui jouera le rôle de régulateur : l'État, la Commission des opérations de bourse, *Big Brother*?

Résilience



Les enfants résilients s'épanouissent malgré les coups du sort

Selon Rudyard Kipling, si un fils peut voir détruire l'ouvrage de sa vie et, sans dire un seul mot, se mettre à reconstruire, il sera un homme. La littérature est friande de jeunesses difficiles, mais surmontées à l'âge adulte : Poil de Carotte, Tarzan, Rémi et Matthias de *Sans famille*. Ces héros – de fiction ou réels – illustrent la résilience telle que l'entendent les psychologues, **la capacité à réussir sa vie en dépit d'une adversité** (environnement parental, guerre, etc.) qui comporte le risque d'une issue négative : ces enfants avaient toutes les chances de mal tourner, mais il n'en a rien été. Né au **xx^e siècle**, ce concept a été abordé par Anna Freud, puis étudié

par Françoise Dolto au moment où l'on s'est intéressé à l'enfance, et enfin popularisé par Boris Cyrulnik. Depuis, on étudie la résilience au travers **des mécanismes de protection** mis en place par l'enfant, ceci afin de pouvoir venir en aide aux enfants en difficulté. Ainsi, on a montré qu'un cadre structuré et qu'un substitut affectif, telle une famille d'accueil, sont indispensables après la période de traumatisme. Les études ont révélé chez les enfants résilients le rôle essentiel du rêve, une projection dans l'avenir, et de l'intellectualisation de leur vie, c'est-à-dire d'un questionnement sur eux-mêmes et sur leur sort. **C'est le triomphe du bonheur sur le malheur!**



La souffrance initiatique, passage obligé vers l'adulte

Les Aborigènes d'Australie, les Masaïs du Kenya et les Indiens d'Amazonie ou d'Amérique du Nord vivent dans des conditions difficiles. Dans nombre de ces peuples, **le passage de l'adolescence à l'âge adulte est l'occasion d'épreuves initiatiques** qui visent à endurcir et renforcer l'impétrant. Le plus souvent, il s'agit d'un isolement dans un lieu éloigné et hostile, comme la forêt, la brousse, le sommet d'une montagne... Cet exil peut être complété ou remplacé par des épreuves physiques, tels des coups de fouet, des piqûres d'insectes, des bains glacés. Chez les Indiens Mandans, aussi nommés O-Kee-Pa,

les jeunes qui prétendent au statut d'homme et de guerrier se faisaient suspendre par des crochets placés dans le dos, dans la poitrine, dans les bras ou dans les cuisses pendant des heures.

Ce rite donnait aux membres de la communauté **une expérience commune de la douleur** qui les préparait à supporter les vicissitudes de leur existence et de celle de leur groupe. Selon les anthropologues, par ces diverses souffrances, les jeunes prennent contact avec la réalité inéluctable et fondamentale d'une vie qui ne les épargnera pas. Ainsi, les épreuves initiatiques renforcent la résistance des jeunes et **augmentent leur résilience.**

Résilience



Les forêts, résilientes, préfèrent la brutalité à la douceur

En novembre 1883, l'éruption du Krakatoa, en Indonésie, recouvre de lave trois îles et y supprime toute trace de vie jusqu'au moindre brin d'herbe. Un siècle plus tard, elles sont recouvertes d'une dense forêt tropicale qui abrite quantité d'espèces végétales et animales.

La nature est résiliente! À ce titre, elle inspire de plus en plus les exploitants forestiers qui souhaitent tirer profit des capacités des écosystèmes à se régénérer après une perturbation comme un incendie ou une coulée de lave. Ainsi, certains biologistes iconoclastes proposent de renoncer aux forêts artificielles aménagées de façon à en maximiser la productivité,

tel un agriculteur qui ne cultiverait qu'une seule essence dans son champ. Ils préconisent plutôt une imitation aussi fidèle que possible de la nature et de sa biodiversité : les nouvelles forêts seraient composées de nombreuses espèces de toutes tailles. Une coupe serait alors équivalente à un incendie, et la forêt perdurerait comme elle le fait dans des conditions naturelles. Dans cette hypothèse, les coupes sélectives et minimales ne sont plus appropriées. Au contraire, les prélèvements se doivent de **refléter autant que possible l'hétérogénéité et la brutalité des perturbations** auxquelles la nature est confrontée depuis des millions d'années. **C'est le paradoxe de la résilience des forêts!**



Évolution et **erreurs fertiles** dans la reproduction des gènes

L'ADN contenu dans le noyau de la cellule orchestre la vie d'un animal : il détermine la synthèse des protéines de l'organisme. Lors de la reproduction, des erreurs de réplication de l'ADN, des mutations, peuvent intervenir. **Ces erreurs sont sources d'amélioration !**

Généralement, ces erreurs ne sont pas bénéfiques, mais le mécanisme introduisant des erreurs est salubre dans la mesure où il constitue une préparation à un changement possible de l'environnement. Lorsqu'intervient une modification climatique, il arrive que ces **mutations aléatoires du génome confèrent à leur détenteur un avantage adaptatif** sur ses

congénères. Les chances de survie des possesseurs de la mutation sont plus grandes, et ceux-ci, vivant plus longtemps, se reproduisent plus abondamment. Ainsi, passée au crible de la sélection, la modification se transmet. De cette façon, Darwin expliqua l'apparition et la disparition des espèces, leur apparition étant le hasard de circonstances favorables, leur disparition résultant d'un génome inadapté aux nouvelles conditions de vie, parce que trop figé. Dans cette optique, l'Évolution sacrifie l'individu à l'espèce et l'espèce à la vie. Les modifications du génome et du climat sont des attaques qui déclenchent **l'apparition des espèces animales et végétales et qui contribuent à la résilience de la vie.**

Résilience



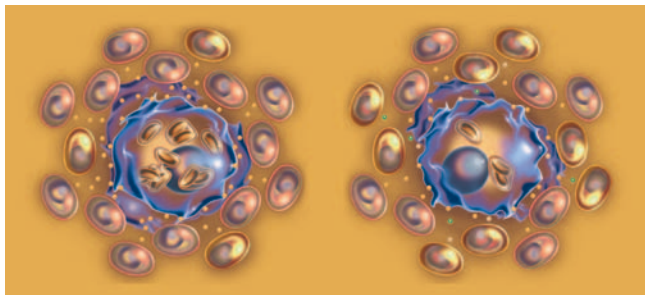
Mithridate, sixième du nom, est la **résilience faite homme**

Son enfance n'est qu'un **long conditionnement à affronter les coups du sort** dont sa vie sera ponctuée. Né en 132 avant notre ère, il fuit à 11 ans le domicile parental après la mort de son père où sa mère aurait joué un rôle. Dans la montagne où il se réfugie, il vit de chasse et s'endurcit au froid, à la faim et à la soif. Par ailleurs, il absorbe des petites doses des poisons les plus répandus à cette époque afin de s'en prémunir.

Après la mort de sa mère et de son frère, il rejoint Sinope, la capitale du Pont, en Asie, et accède au trône. Son règne n'est qu'une suite de conquêtes et de batailles, notamment contre Rome. Les populations des premières villes, libérées du joug romain,

l'accueillent en libérateur, mais les défaites succèdent aux victoires, et le roi se réfugie en Arménie d'où il assiste à la déchéance de son royaume et à la trahison de son fils Macharès, qui fait la paix avec les Romains. En -66, le courage de Mithridate est encore entier, mais celui de ses sujets s'émousse : ils se révoltent et couronnent son autre fils, Pharnace.

Las, le seul roi qui s'opposa avec succès à l'Empire romain, tente de se suicider. C'est quand la résilience lui fait défaut qu'elle opère : **le poison qu'il avale est sans effet. La mithridatisation est née!** Seul le glaive d'un esclave emportera «le roi magnanime» qui, selon Montesquieu, «dans les adversités, tel un lion qui regarde ses blessures, n'en était que plus indigné».



L'attaque du vaccin augmente la **résilience** de l'organisme

Deux millions de personnes meurent chaque année de la tuberculose dans le monde. Pourtant, si la vaccination n'existait pas, les méfaits de *Mycobacterium tuberculosis*, le bacille agent de cette maladie, seraient autrement plus considérables. En effet, **les vaccins augmentent la résilience des individus** face aux micro-organismes pathogènes.

Le vaccin contre la tuberculose mis au point par Calmette et Guérin au début du ^{xx}e siècle est préparé par l'épuisement progressif des bacilles. Le système immunitaire de l'organisme inoculé par ces bacilles atténués réagit en amplifiant les résistances des

cellules immunitaires qui évacuent le bacille. Lors d'une attaque ultérieure du bacille, **le système immunitaire «préconditionné» par le BCG sait mieux lutter contre l'infection.**

À la fin des années 1970, l'incidence de la tuberculose avait tant diminué dans les pays industrialisés que la question s'est posée : devait-on continuer la vaccination ? Aujourd'hui on ne vaccine que dans les pays où l'incidence de la tuberculose est élevée, mais les chiffres indiquent qu'il faudrait le faire plus efficacement.

Ainsi, une première atteinte de l'organisme a augmenté sa résilience, et le vieil adage *Si vis pacem para bellum* est toujours applicable à la lutte anti-microbienne.

Résilience



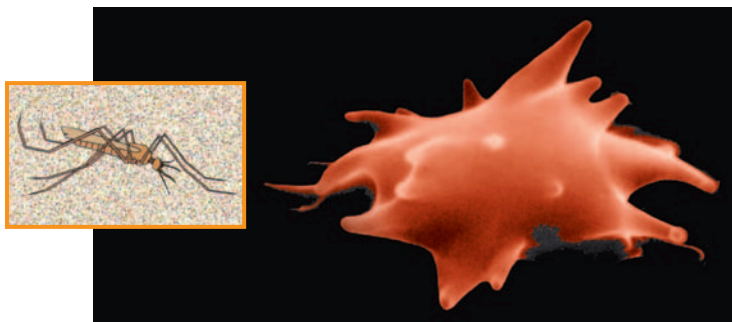
Quand un antibiotique favorise **la résilience** des bactéries

En 1941, presque toutes les souches des bactéries Staphylocoques dorés sont sensibles à la pénicilline G. En 1944, une part importante des souches hospitalières y est résistante. Plus encore, depuis 1980, des souches résistant à la méthicilline et à ses dérivés, employés à la place de la pénicilline, sont apparues et sont de plus en plus fréquemment isolées en milieu hospitalier. Ainsi, en quelques années, des populations de bactéries en contact avec un antibiotique «apprennent» à le contrecarrer.

Cet exemple **illustre la résilience des populations bactériennes.** Plusieurs mécanismes expliquent cette résilience. Par exemple, les bactéries se multiplient

rapidement, jusqu'à toutes les 20 minutes pour certaines, et sont ainsi sujettes à de nombreuses mutations.

Celles-ci modifient parfois le récepteur aux antibiotiques, qui, cantonné à l'extérieur, devient inactif. Par ailleurs, des gènes de résistance, tels ceux d'enzymes qui modifient ou détruisent les molécules d'antibiotiques, portés par des plasmides (des petites molécules d'ADN circulaire), peuvent être transmis d'une bactérie à une autre. Ainsi, en présence d'un antibiotique, des bactéries résistantes apparaissent, prolifèrent et supplantent peu à peu celles qui étaient sensibles. **Au final, une population bactérienne sensible à un antibiotique devient, en sa présence, résiliente.**



«À quelque chose, malheur est (biologiquement) bon»

Les liens entre la drépanocytose et le paludisme illustrent la sagesse populaire empreinte de fatalisme. Ces deux maladies n'ont à première vue rien de commun. La première, aussi nommée anémie falciforme, résulte d'un défaut de l'hémoglobine. Cette protéine anormale, quand elle a fixé l'oxygène dans nos globules rouges, est moins soluble et forme alors des cristaux allongés : les cellules qui l'abritent ont une forme de faucille et, fragilisées, sont détruites précocement. La seconde résulte de l'infection d'un parasite, *Plasmodium*, transmis par la piqûre d'un moustique anophèle : le micro-organisme envahit les globules rouges où il se reproduit. Pourtant,

dès 1949, le biologiste J.B.S. Haldane est frappé de la concordance des cartes de distribution du paludisme et de la drépanocytose. L'explication est génétique : les individus porteurs d'un gène muté et d'un gène normal sont plus résistants au *Plasmodium* que les individus sans gène muté. Aussi, en Afrique et en Asie où le paludisme fait des ravages, ces individus ont plus de chances que les autres d'avoir une descendance nombreuse : le gène muté est maintenu dans la population. Selon une hypothèse, le parasite qui se nourrit des protéines du globule rouge ne reconnaît pas l'hémoglobine modifiée et ne peut survivre. Ainsi, une maladie protège contre une autre!

Résilience



La plasticité du phénotype augmente la résilience

Les grenouilles communes se reproduisent dans des mares qui s'assèchent parfois avant la métamorphose des larves. Comment résister aux aléas du climat? Des études ont montré que les larves exposées à l'assèchement se métamorphosent plus rapidement que celles qui restent dans un environnement constant. Pourtant, les mécanismes de cette transformation sont inscrits dans des gènes qui sont identiques d'une grenouille étudiée à l'autre. Ainsi, cette plasticité n'est pas génomique ; c'est la plasticité phénotypique, la capacité d'un génome à adapter la morphologie et la physiologie des individus aux fluctuations de leur milieu. Il s'agit de la source ultime

de la diversité biologique! Autres exemples plus proches de nous : lors d'un séjour en altitude, le nombre de globules rouges dans notre sang augmente pour compenser la raréfaction de l'oxygène ; au soleil, notre peau brunit pour résister aux rayonnements ultraviolets. Ces mécanismes qui ont été sélectionnés au cours de l'évolution confèrent aux individus — animaux ou végétaux — qui en sont pourvus une plus grande flexibilité et un moyen de s'adapter à plusieurs environnements. Là où un génome rigide serait inadapté face à une trop grande variabilité du milieu, les gènes de la plasticité phénotypique sont le support de la résilience des individus face à l'imprévu.



La résistance du cœur face au manque d'oxygène : le cœur a sa résilience que la raison connaît

Des épisodes brefs de souffrance cardiaque sont à l'origine de la **résilience myocardique face à l'ischémie**. Depuis 1986, de nombreuses études expérimentales ont démontré que des cycles brefs d'ischémie-reperfusion protègent le cœur de lésions irréversibles lors de la survenue d'épisodes ischémiques plus sévères et plus longs. Chez l'animal, des expériences d'occlusions coronaires brèves sublésionnelles précédant un épisode d'occlusion prolongé entraînent une réduction de la taille de l'infarctus de 60 pour cent. Chez l'homme, lors d'une intervention de chirurgie cardiaque avec circulation

extracorporelle, un clampage bref et intermittent de l'aorte limite la consommation d'énergie au cours d'une ischémie globale ultérieure prolongée. De même, l'on sait que lorsque des patients ont un infarctus précédé d'épisodes d'angine de poitrine, la zone de nécrose est plus limitée, la mortalité et le risque de développement d'une insuffisance cardiaque moindres que chez les patients présentant un infarctus d'emblée.

Chez l'animal et chez l'homme, les études suggèrent un rôle essentiel des canaux potassiques dans cette protection endogène, **base de la résilience myocardique face à l'ischémie**.

Résilience

« Pour en savoir plus » :

- Jean RACINE, *Mithridate*, Gallimard.
- Boris CYRULNIK, *Ces enfants qui tiennent le coup* - 2^e édition, Hommes et Perspectives, 1998.
- Boris CYRULNIK, *Les vilains petits canards*, Odile Jacob, 2001.
- Dossier : *De l'importance d'être imparfait*, Pour la Science n° 200, juin 1994.
- I. THORNTON, Krakatoa, *The Destruction and reassembly of an Island Ecosystem*, Harvard University Press, 1999.
- J. LESOURNE, *Économie de l'ordre et du désordre*, Economica, 1991.
- E. KRÄHENBÜHL et R. GOTTHARDT, *Mémoire de formes, formes en mémoire*, Presses polytechniques et universitaires romandes, 2002.
- Jean Paul DELAHAYE, *Information, complexité et hasard*, Hermès Sciences, 1999.
- Hervé LE GUYADER (sous la direction de), *L'évolution*, Belin-Pour la Science, 1998.

- VINCENT Thomas Louis, *L'anthropologie de la mort*, Payot, 1975.
- C.E. MURRY, R.B. JENNINGS et K.A. REIMER, *Preconditioning with ischemia : a delay of lethal cell injury in ischemic myocardium*, in *Circulation*, n° 5, pp. 1124-1136, 1986.
- G.S. LIU et al., *Protection against infarction afforded by preconditioning is mediated by A1 adenosine receptors in rabbit heart*, in *Circulation*, n° 84, pp. 350-356, 1991.
- M. OVIZE et al, *Coronary cyclic flow variations precondition the ischemic myocardium*, in *Circulation*, n° 85, pp. 779-789, 1992.
- D.M. YELLON et al., *Preconditioning the human heart*, in *Lancet*, n° 342 (8866), pp. 276-277, 1993.
- E. DEUTSCH et al., *Adaptation to ischemia during percutaneous transluminal angioplasty : clinical, hemodynamic, and metabolic features*, in *Circulation*, n° 82, pp. 2044-2051, 1990.

L'ordinateur ultime

JEAN-PAUL DELAHAYE

Depuis le Big Bang, l'Univers, vu comme un ordinateur, a effectué 10^{120} calculs élémentaires. Nos limites physiques du calcul seront atteintes avant 200 ans ; pourrions-nous jamais disposer d'une puissance de calcul infinie qui engendrerait des paradoxes ?

Quand nous déplaçons une boule de haut en bas sur l'une des colonnes d'un boulier, nous effectuons une opération binaire de calcul, tout comme lorsque nous ouvrons un interrupteur, lorsqu'un condensateur se charge, lorsque l'état d'un transistor bascule, lorsqu'une porte logique détermine le OU logique entre ses deux entrées, etc.

Un ordinateur ne fait rien d'autre que de combiner des opérations binaires : le microprocesseur évalue le produit de 2345 par 721921, recherche un mot dans un dictionnaire, modifie un document affiché à l'écran, décomprime une page provenant du réseau Internet, exécute une piste du CD-audio placé dans votre lecteur, etc.

Tout changement, tout mouvement, toute interaction dans le monde physique peuvent être décomposés en suite d'opérations binaires, donc en calculs. De ce point de vue, tout système physique est un ordinateur qui, à chaque instant, enchaîne des opérations, et la physique, finalement, n'est que la théorie du calcul.

Parions que cette idée – qu'on dénomme déjà la réductionnisme computationnel – aura un grand succès dans le siècle qui commence. Elle remplacera sans doute l'idée chère au XVIII^e siècle selon laquelle l'univers est une grande horloge dont les engrenages complexes nous entraînent indéfiniment dans leur course, ou l'idée concurrente du XIX^e siècle que l'univers n'est qu'une machine thermodynamique dégradant sans cesse l'énergie et s'acheminant inéluctablement vers la mort thermique. Nous ne prétendons pas que l'assimilation du monde physique à un ordinateur est une conception qui résume et dépasse toutes les autres, mais qu'il est amusant d'en explorer les conséquences. Nous vous proposons ici de réfléchir à cette troublante hypothèse que des travaux récents corroborent.

En 1998, les physiciens Norman Margolus et Lev Levitin, de l'Université de Boston, se sont posé la question fondamentale : combien d'états distincts un système physique donné peut-il occuper dans un temps donné ? Autrement dit, quelle est la vitesse maximale de changement d'un système physique ? On sait, d'après le principe d'incertitude de Heisenberg appliqué à l'énergie et au temps, que pour mesurer l'énergie E d'un système il faut au moins passer un temps t tel que le produit $E \times t$ soit égal à h , la constante de Planck, qui vaut $1,0545 \times 10^{-34}$ joule-seconde. Une variante élaborée de ce principe, le Théorème de Margolus-Levitin, indique que le nombre maximum d'états distincts qu'un système d'énergie moyenne E peut occuper par seconde, c'est-à-dire sa vitesse de calcul si on le considère comme un ordinateur, est donné par l'expression simple : $2E/\pi h$, où π est l'inévitable 3,14159...

Or l'énergie d'un corps de masse m est, nous le savons depuis Einstein, est égale à mc^2 . Un ordinateur portable d'une masse de 1 kilogramme, donc d'énergie $8,9874 \times 10^{16}$ joules, peut, en conséquence, opérer un maximum d'environ 10^{51} opérations binaires par seconde. Ce nombre est la puissance maximale d'un ordinateur portable ultime d'un kilogramme. Si la mécanique quantique est bien la théorie adaptée à ce genre de problèmes – ce que l'on croit aujourd'hui – alors jamais dans l'avenir, quels que soient les progrès que feront les sciences et les technologies, vous ne disposerez sur votre table d'un ordinateur de un kilogramme ayant une puissance de calcul supérieure à ces 10^{51} opérations par seconde.

1. SI LES FACULTÉS DE CALCUL DE L'UNIVERS sont telles qu'il peut simuler sa propre dynamique, il s'ensuit des paradoxes dignes de la science-fiction.

En sommes-nous loin ? Combien de temps faudra-t-il pour que cette limite absolue soit atteinte ?

HERTZ, INSTRUCTIONS, OPÉRATIONS BINAIRES ?

À vrai dire, aucune de ces questions n'est simple, car les mesures de puissance des ordinateurs contemporains sont données en hertz (nombre de cycles d'horloge par seconde du microprocesseur) ou en instructions par seconde (une instruction est une opération entre groupes de données : comparaison, addition ou multiplication de deux entiers, recopie d'un mot mémoire, incrémentation d'un compteur, etc.).

Si l'on peut admettre, en gros, qu'un hertz correspond à quelques instructions par seconde (de un à dix selon les microprocesseurs), en revanche la conversion des instructions en opérations binaires est délicate, car tout change d'un microprocesseur à un autre et ce qui se passe au cours d'un cycle est très variable. Les processeurs actuels comportent plusieurs millions de transistors (42 millions de transistors pour le Pentium-IV) donc, à chaque cycle d'horloge du microprocesseur, un très grand nombre d'opérations binaires peuvent être effectuées, en théorie plusieurs millions. En revanche, le nombre d'opérations binaires utiles (impossibles à réduire par une meilleure conception des circuits ou organisation des calculs) est bien plus petit : pour additionner deux entiers codés sur 32 bits, une centaine d'opérations binaires suffisent ; pour une multiplication, un millier d'opérations binaires conviennent. Le facteur de conversion entre cycle (ou instruction) et opération