



Pour réagir aux articles : courrier@pouirlascience.fr
ou directement sur les pages correspondantes du site www.pouirlascience.fr

✓ UN VOTE TROP COMPLIQUÉ

Les auteurs de l'article *Ne votez pas, jugez !* (Pour la Science n° 414, avril 2012, http://bit.ly/414_vote) ont-ils imaginé le comportement de 44 millions d'électeurs devant le système de vote astucieux mais très compliqué qu'ils proposent, le jugement majoritaire ? Et comment dépouiller des millions de bulletins comportant 70 cases ?

Pierre Deloye

Il existe plus simple et plus efficace que le jugement majoritaire : le scrutin majoritaire à un tour. Il permet de couper court à toutes les petites candidatures irresponsables et aux manipulations électorales entre les deux tours. C'est ce que pratique la Grande-Bretagne, qui reste un modèle de démocratie.

Charles Henri Germa

→ RÉPONSES DE MICHEL BALINSKI ET RIDA LARAKI

En ce qui concerne la complexité du jugement majoritaire, plusieurs milliers de personnes ont pratiqué ce mode de scrutin dans divers sondages et expériences électorales, toujours rapidement, avec satisfaction, sans difficulté.

Il existe plusieurs modalités de mise en œuvre ; en voici deux. Une urne pour chacun des candidats pourrait être installée. Les votants y glisseraient la mention qu'ils attribuent à ce candidat. Le dépouillement compterait la répartition des mentions de chaque urne. Pour 10 candidats, il faudrait environ cinq fois plus de temps qu'avec le scrutin majoritaire habituel. Mais garantir l'élection du meilleur candidat n'en vaut-il pas la peine ?

Autre solution, une machine de vote électronique pourrait imprimer le bulletin de vote tel que présenté dans l'article, pour fournir à l'électeur un reçu de son vote et permettre un recours. Le dépouillement, lui, serait effectué par la machine en quelques secondes.

Concernant le scrutin majoritaire à un tour, comme l'avait signalé Borda dès 1770, il n'y a pas pire ! Ce mode de scrutin minimise la proba-

bilité d'élire le candidat préféré des électeurs. Les sondages de début avril 2012 confirment par exemple que le candidat réellement voulu par l'électorat pourrait perdre : François Hollande gagne contre Nicolas Sarkozy en face-à-face, mais n'arriverait que deuxième avec le scrutin majoritaire à un tour. En outre, ce mode de scrutin majoritaire ne favorise pas le vote honnête : en cas de nombreuses candidatures, pour qui voter ? Son favori, même quand celui-ci n'a aucune chance ? Un candidat extrême, pour protester ? Ou « utilement », sans être certain que le calcul soit le bon ?

✓ SCÉNARIOS ÉNERGÉTIQUES EN DÉBAT

L'article *Choix énergétiques : un débat biaisé* (Pour la Science n° 414, avril 2012, <http://bit.ly/414-dessus>), a suscité de nombreuses réactions. Rappelons qu'il n'avait pas vocation à être exhaustif, mais plutôt à alimenter le débat...

C'est chose faite ! Voici deux points parmi toutes les remarques – voire les critiques – soulevées. Retrouvez-les *in extenso* sur notre site Internet.

Pourquoi ne pas évoquer le scénario *Négatep*, proposé par l'association *Sauvons le climat* ? Ce scénario vise à diviser par quatre les émissions de gaz à effet de serre, et s'attaque donc en priorité aux sources d'énergie autres qu'électrique. Les énergies renouvelables se substitueraient à une partie des énergies fossiles, et non pas au nucléaire, sans lequel les économies proposées dans l'article ne sont pas tenables.

Jean-Pierre Gaillet

Comment diminuer la consommation d'électricité de 34 pour cent d'ici à 2031 ? L'efficacité énergétique est en effet déjà mise en œuvre dans le domaine de l'électricité, où le seul potentiel d'économie reste le chauffage individuel. Sans compter que la généralisation des véhicules électriques entraînerait une demande supplémentaire de 60 TWh/an. Par ailleurs, pour atteindre d'ici 2031 les capacités de production photovoltaïque et éoliennes proposées, il faudrait multiplier par 292 la première et par 14 la seconde ! C'est irréalisable.

Christophe de Reyff

→ RÉPONSE DE BENJAMIN DESSUS

Le scénario *Négatep* fait en effet partie des rares scénarios énergétiques complets existants. Cependant, comme tous les autres scénarios présentés à l'exception du scénario *Négawatt* et de la note de *Global Chance*, il présente une augmentation de la consommation d'électricité d'ici 2050.

Par ailleurs, le but de l'article n'était pas de recenser l'ensemble des scénarios énergétiques, mais de comparer, du point de vue des coûts pour l'usager et la collectivité, des stratégies électriques fondées sur la poursuite des tendances actuelles avec des stratégies d'économie d'électricité. D'où le choix comme référence d'un scénario central du ministère de l'Industrie.

En outre, le scénario *Négatep* repose sur l'implantation à moyen terme de réacteurs de quatrième génération... qui n'existent pas encore.

Concernant l'efficacité énergétique, le chauffage électrique, avec l'eau chaude, ne représente que 80 TWh sur une consommation des bâtiments résidentiels de l'ordre de 280 TWh. Le reste est imputable aux applications dites spécifiques de l'électricité. Les possibilités d'économies dans ce domaine sont très importantes et économiquement rentables.

Bien entendu, si les applications de l'électricité changeaient fondamentalement (par exemple avec l'arrivée massive de véhicules électriques), la consommation augmenterait. Mais la comparaison a été établie avec un scénario officiel répondant aux mêmes types de besoins.

Par ailleurs, le rythme d'implantation du système électrique proposé suit celui de la loi du Grenelle de l'environnement pour 2020. La multiplication par deux de l'éolien entre 2020 et 2030 se justifie par l'arrivée à maturité des champs éoliens offshore. L'implantation d'une capacité de production photovoltaïque de 50 TWh suppose que la compétitivité économique soit acquise à cet horizon, et non plus seulement la parité avec le prix de l'électricité. Cette hypothèse est probable vu la baisse du coût des cellules photovoltaïques. On peut aussi remarquer que les rythmes en vigueur en Allemagne sont du même ordre.

Les virus géants

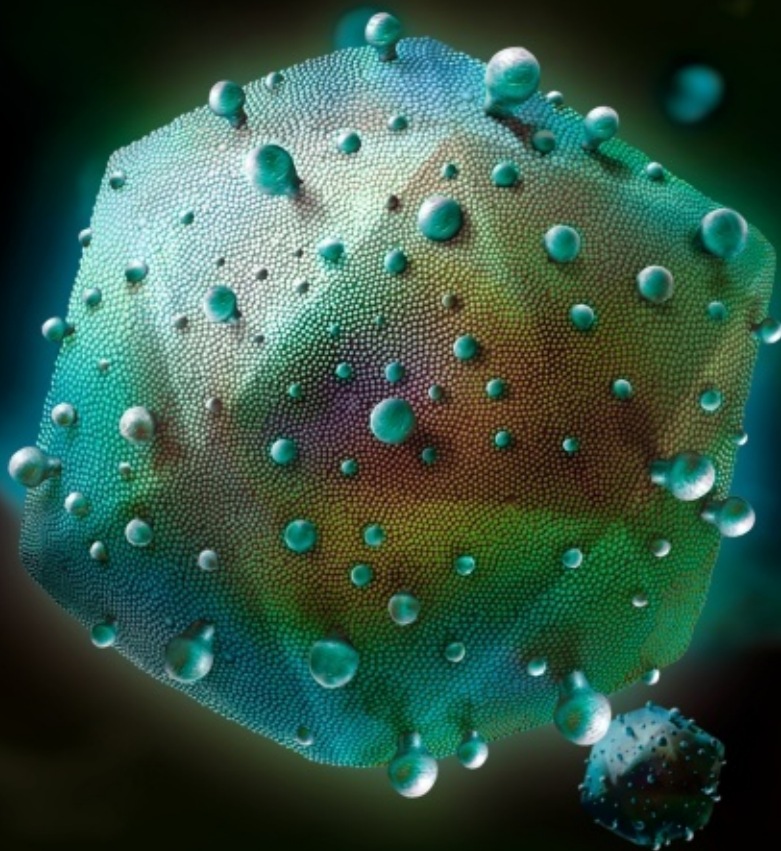
Une nouvelle forme de vie ?

Trop petits pour être visibles au microscope optique, dépourvus de métabolisme, les virus que l'on connaissait depuis la fin du XIX^e siècle sont vus comme des parasites inanimés et non comme des organismes vivants. Munis d'une poignée de gènes, ils sont juste capables de détourner à leur profit l'appareil génétique de la cellule qu'ils infectent pour lui faire produire d'autres particules virales identiques.

La découverte récente de virus plus gros que certaines bactéries, en particulier *Mimivirus* en 2003 et *Megavirus* en 2010, bouleverse ce tableau (voir page 22). Ce n'est pas une pure question de taille. Les virus géants ont plusieurs centaines à plus d'un millier de gènes, beaucoup plus que nécessaire pour un simple détournement du noyau de la cellule hôte. Ils contiennent aussi diverses protéines, enzymes et séquences d'ARN. Et surtout, ils ne font pas appel à l'appareil génétique de la cellule infectée pour se répliquer : ce processus a lieu dans le cytoplasme de la cellule, en utilisant seulement les ribosomes et les nutriments de l'hôte (voir page 30).

Ce mode de réplication plus indépendant et le fait que, contrairement au cas des virus classiques, la plupart des gènes des virus géants ne proviennent pas d'autres organismes connus posent en des termes nouveaux la question de l'origine des virus et de leur appartenance ou non au monde vivant. On espère de nouvelles découvertes pour nourrir le débat. En particulier, des missions d'exploration telles que *Tara Oceans* ont récemment montré que le monde des virus aquatiques, auquel appartiennent les virus géants, est d'une richesse insoupçonnée et qu'il joue un rôle de premier plan dans la biosphère (voir page 34). Ces moissons océaniques pourraient bien apporter un grand nombre de nouveaux virus géants, et leurs résultats sont donc attendus avec impatience.

La rédaction



VUE D'ARTISTE du virus EhV, qui infecte l'algue unicellulaire *Emiliania huxleyi*. Son ADN est composé de 407 000 paires de bases et coderait plus de 450 protéines. Son diamètre, près de 0,2 micromètre, est modeste par rapport à celui de certains autres virus géants.

Les virus

James Van Etten

L'ESSENTIEL

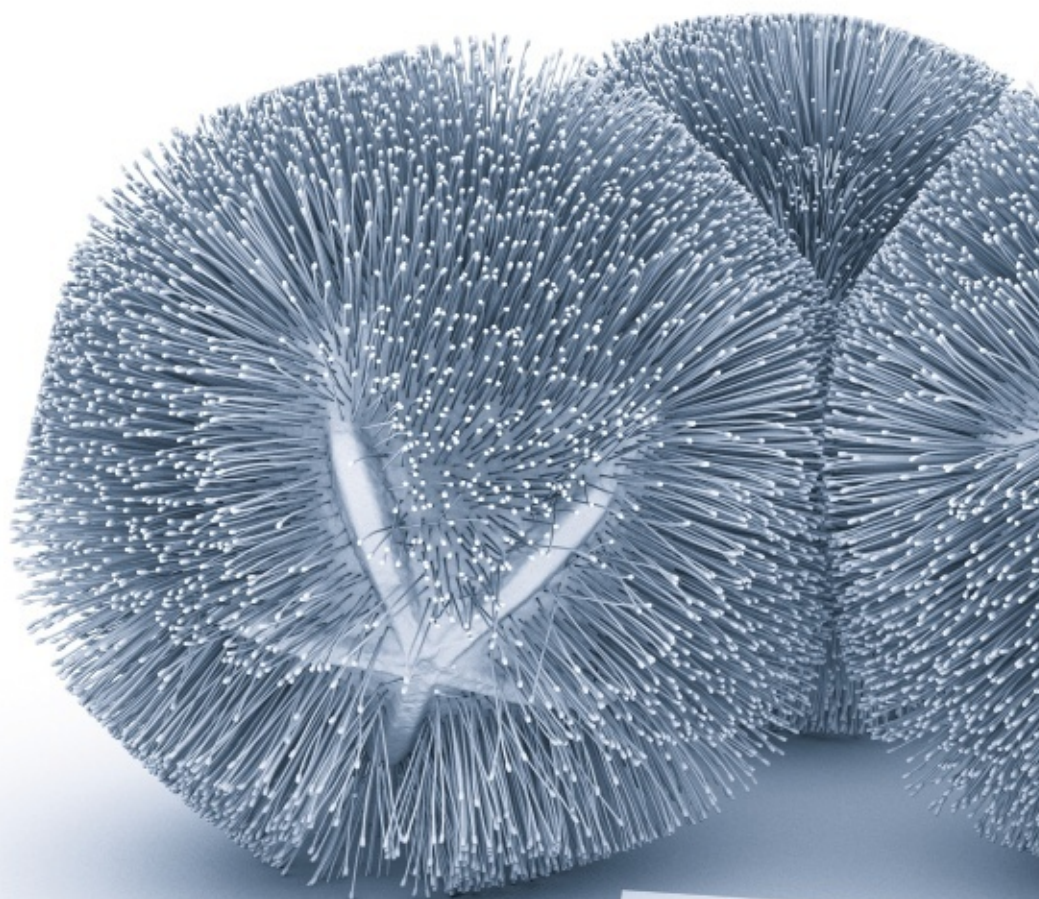
✓ Plusieurs virus de grande taille ont été découverts au cours des dix dernières années, et l'on soupçonne l'existence de très nombreux autres.

✓ Ces virus ont un grand nombre de gènes, dont la plupart n'ont pas d'équivalents connus chez d'autres organismes.

✓ Certains des virus géants jouent un rôle biologique et environnemental important.

✓ L'origine des virus géants et leur parenté avec les diverses branches du vivant restent fortement débattues.

Campbell Strong et Gaël McGill, Digizyme Inc. (www.digizyme.com)



Mimivirus

Rhinovirus



géants

La découverte récente de virus plus gros que certaines bactéries bouleverse notre conception de la nature des virus et de l'histoire de la vie.



Selon la conception classique, correcte pour l'essentiel, un virus ressemble à un minuscule cambrioleur : il pénètre furtivement dans une cellule vivante, s'empare des commandes de la biosynthèse et contraint la cellule à lui fabriquer un grand nombre de descendants. Ces derniers s'échappent ensuite de leur hôte et vont perpétuer dans d'autres cellules le cycle de réplication. Les virus sont supposés très petits par rapport à la taille des cellules, qui est de l'ordre du micromètre (un millième de millimètre, ou 1 000 nanomètres), et se contenter de quelques gènes bien adaptés.

Cette vision a volé en éclats à partir des années 2000, avec la découverte de virus aussi gros que des bactéries et dotés de caractéristiques qui les distinguent nettement des virus ordinaires, notamment un génome de grande taille contenant plusieurs centaines de gènes. Ces virus géants ont ouvert un nouveau domaine de recherche aux biologistes, dont les idées sur la frontière entre les virus et le vivant, ainsi que sur l'origine des virus, se voient remises en question.

1. CERTAINS VIRUS récemment découverts, tel *Mimivirus*, sont géants par rapport à d'autres, tels les rhinovirus (responsables des rhumes et rhinites) et le VIH (le virus du sida).

L'histoire remonte à 1992. Cette année-là, on découvrit un nouveau micro-organisme provenant d'une tour de refroidissement d'une centrale électrique à Bradford, en Angleterre. Timothy Rowbotham, microbiologiste au Laboratoire de santé publique de Leeds, y recherchait l'agent responsable d'une épidémie locale de pneumonie. Ses investigations le conduisirent vers les eaux chaudes de cette tour de refroidissement ; un tel milieu est un réservoir bien connu de bactéries pathogènes du genre *Legionella*, responsables de la légionellose, une forme grave de pneumonie.

Des parasites dans une amibe

Les particules présentes dans l'échantillon ont dans un premier temps été prises pour des bactéries. La microscopie les révélait à l'intérieur d'amibes de l'espèce *Acanthamoeba polyphaga*, qui se nourrissent en ingérant bactéries et autres microparticules. Mais le génome de ces entités s'est révélé très différent de celui des bactéries. Onze ans plus tard, en 2003, les travaux de Didier Raoult, Jean-Michel Claverie et leurs collègues, à l'Université de Méditerranée à Marseille, éclaircissent la question : ces organismes

mystérieux sont des virus géants, auxquels on donna un nouveau nom, *Acanthamoeba polyphaga Mimivirus*, le terme *Mimivirus* étant la contraction de *Microbe mimicking virus*, c'est-à-dire virus imitant un microbe.

Un virus qui mesure près d'un micromètre

Mimivirus était alors le plus grand virus jamais découvert. On connaissait de gros virus depuis quelques années. La plupart font partie des « grands virus nucléocytoplasmiques à ADN », ou NCLDV (de l'anglais *nucleo-cytoplasmic large DNA viruses*). Ce groupe comprend plusieurs familles. Citons les Poxviridés, qui infectent des vertébrés (tel le virus de la variole) et des invertébrés, les Iridoviridés et Ascoviridés, qui parasitent des insectes et des vertébrés à sang froid, les Phycodnaviridés, des virus aquatiques dont les hôtes sont des algues vertes, et les Asfarviridés, des virus de mammifères.

On considère comme géants les virus dont le génome a plus de 300 000 paires de bases et dont la capsid (l'enveloppe du virus, formée de protéines) mesure environ 0,2 micromètre ou plus. *Mimivirus*, dont le diamètre atteint environ 0,75 micromètre, est un géant parmi les virus géants. Son génome comporte plus de 1,182 million de paires de bases et code 1 018 protéines, des chiffres énormes selon les normes virales. *Mimivirus* a d'ailleurs été détrôné en 2010 par *Megavirus chilensis*, un virus géant

découvert dans les eaux chiliennes par l'équipe de J.-M. Claverie: *Megavirus chilensis* a une taille supérieure de dix pour cent à celle de *Mimivirus*, et son génome est formé de 1,259 million de paires de bases, pour 1 120 protéines codées.

Pour comparaison, la plus petite bactérie vivant à l'état libre, *Mycoplasma genitalium*, ne mesure que 0,45 micromètre, a un génome de taille moitié de celui de *Mimivirus* et ne code que 482 protéines. Et l'organisme cellulaire le plus petit connu, *Hodgkinia cicadicola*, une bactérie parasite de certaines cigales décrite en 2009, a un génome de seulement 140 000 paires de bases, qui ne code que 169 protéines.

Les virus géants ont une taille supérieure à 0,2 micromètre et leur génome comporte plus de 300 000 paires de bases.

La plupart des virus géants n'ont été découverts et caractérisés que ces toutes dernières années. L'une des principales raisons est que, pour isoler les particules virales, on utilise généralement des filtres dont les pores mesurent 0,2 micromètre. En pratique, les virus sont définis comme des agents qui se répliquent et qui passent à travers de tels filtres. On comprend donc

que l'on n'ait pas détecté de virus plus gros que la porosité des filtres.

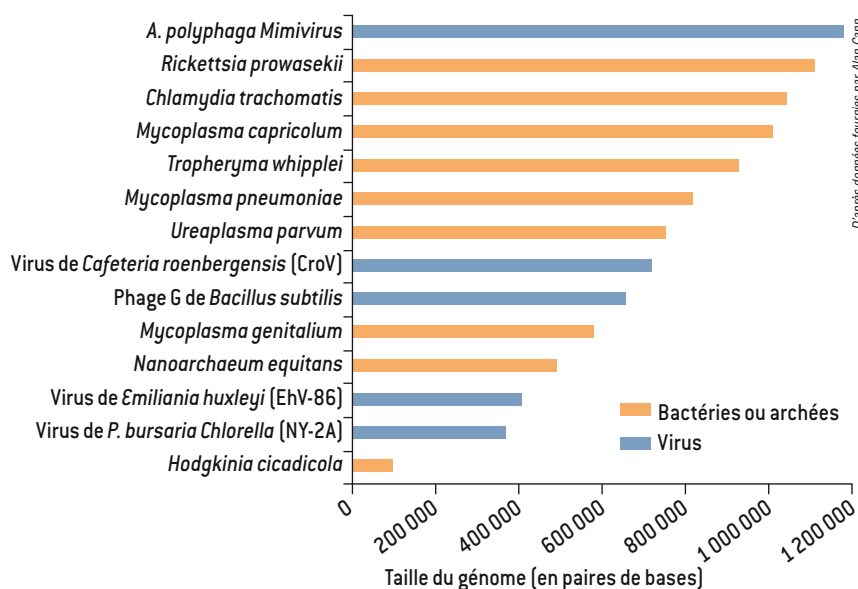
Par ailleurs, les méthodes habituelles de culture ne permettaient pas de mettre en évidence la présence de virus géants, car ces grosses particules s'enfonçaient dans la gélose molle servant de milieu de culture aux bactéries et autres organismes hôtes, ce qui les empêchait de se disséminer et de former des plaques visibles. Une autre explication du caractère insaisissable des plus grands virus est que beaucoup d'entre eux infectent des protistes, organismes unicellulaires qui attirent beaucoup moins l'attention que les végétaux et les animaux.

Les projecteurs étant aujourd'hui enfin braqués sur eux, les virus géants offrent un nouveau terrain d'exploration: quelle est l'origine de ces surprenants agents? Quelle est leur structure? Par quels mécanismes se répliquent-ils? Quelle est leur place dans le monde vivant? Quel rôle y jouent-ils? Les biologistes ne font que commencer à répondre à ces questions.

Mimivirus est bien représentatif des virus géants. Son virion – la particule qui regroupe les éléments structuraux du virus, en particulier son matériel génétique et la coque de protéines – a un cœur à peu près icosaédrique d'environ 500 nanomètres (un icosaèdre est un polyèdre constitué de 20 faces triangulaires). Ce cœur est chevelu: il est recouvert par un ensemble dense de fibrilles radiales longues d'environ 140 nanomètres. Les scientifiques n'ont pas encore complètement caractérisé les fibrilles, mais la présence dans le génome de *Mimivirus* de gènes semblables à ceux permettant la synthèse des parois bactériennes suggère qu'elles pourraient être de constitution voisine. *Mimivirus* et *Megavirus* sont les seuls NCLDV que l'on connaisse munis de cette enveloppe de fibrilles.

Autre particularité du virion de *Mimivirus*: l'un des sommets de la capsid icosaédrique présente une structure proéminente en forme d'étoile à cinq branches (voir les figures 1, 3 et 4). Cette structure a un rôle central dans le processus d'infection de la cellule.

Quand une amibe ingère un *Mimivirus*, ce dernier pénètre dans la cellule à l'intérieur d'une vacuole, compartiment bordé d'une membrane, qui fusionne avec des lysosomes, des organites digestifs. C'est probablement l'activité des enzymes lysosomales qui provoque l'ouverture de la structure en étoile du virion. Il semble qu'ensuite, une membrane interne au



D'après données fournies par Alan Cam

2. LES GÉNOMES DES VIRUS GÉANTS peuvent être plus grands que ceux de certaines bactéries. Ces génomes présentent des nouveautés. Ainsi, dans le cas de *Mimivirus*, 86 pour cent de ses séquences codant des protéines n'ont pas de gènes homologues connus dans les génomes cellulaires.