



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 ; pourrons-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

binaire est donc un nombre entre dix et quelques millions et dépend arbitrairement du fait qu'on souhaite évaluer le nombre d'opérations utiles ou le nombre d'opérations physiques réelles qui, lui, dépend du niveau de détail avec lequel on observe le microprocesseur.

Comme certains physiciens le font parfois, et tout en étant bien conscients qu'il s'agit d'une conversion terriblement simplificatrice et approximative, nous adopterons : 1 hertz = 1 instruction par seconde = 10^5 opérations binaires par seconde.

Les ordinateurs portables actuels ont une puissance d'environ 10^9 hertz (le fameux gigahertz devenu banal depuis deux ans), donc de 10^{14} opérations binaires par seconde. Nous sommes donc très loin de la limite des 10^{51} opérations binaires par seconde donnée par le théorème de Margolus-Levitin. La loi de Moore indique que la puissance informatique de calcul double

environ tous les 18 mois, soit un gain d'un facteur 10 tous les 5 ans. Cette loi empirique est vérifiée depuis 30 ans. À cause de la limite donnée par Margolus et Levitin, cette loi ne pourra pas être satisfaite indéfiniment et au plus tard cessera de s'appliquer dans 200 ans. Il y a 37 ordres de grandeurs à franchir entre les 10^{14} opérations binaires par seconde de nos ordinateurs d'aujourd'hui et les 10^{51} opérations par seconde de l'ordinateur portable ultime : à raison d'un ordre de grandeur tous les cinq ans, il faudrait 185 ans.

UNE MÉMOIRE THERMONUCLÉAIRE!

Seth Lloyd, s'appuyant sur les travaux de J. Bekenstein, a calculé la mémoire maximale d'un ordinateur ultime d'un kilogramme et d'un volume d'un litre : $2,13 \times 10^{31}$ bits, c'est-à-dire environ

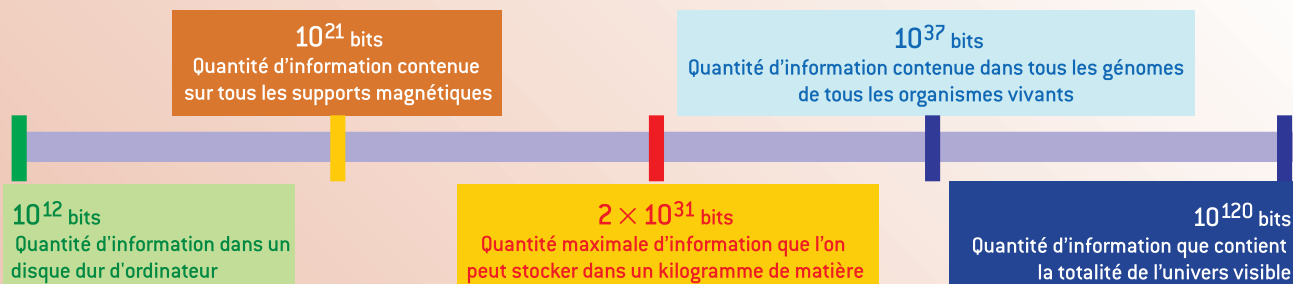
3×10^{30} octets (un octet est égal à huit bits). Pour obtenir une telle densité de mémoire, S. Lloyd fait remarquer qu'il faudrait transformer toute la matière en énergie et qu'en conséquence la mémoire de l'ordinateur ultime ressemblerait à une explosion thermonucléaire ou à un petit morceau du Big Bang... La commercialisation et l'utilisation d'un tel «appareil portable» poseront quelques problèmes pratiques. Aujourd'hui les capacités maximales de stockage de nos dispositifs les plus performants d'un kilogramme et d'un litre sont d'environ 10^{12} octets (un téraoctet) : encore 28 ordres de grandeur à franchir (soit 140 ans)!

Notons que les 2×10^{31} bits de l'ordinateur portable ultime correspondent à environ 20 milliards de fois l'information totale stockée aujourd'hui sous forme électronique à la surface de la terre, qui est évaluée à environ 10^{21} bits (voir l'article de cette rubrique de septembre 2002).



Javier Dauden/Corbis/IG

2. QUANTITÉS ASTRONOMIQUES D'INFORMATIONS

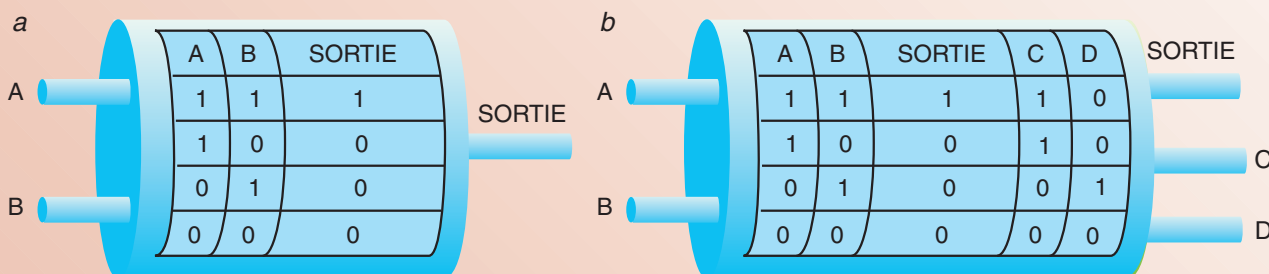


3. LA THERMODYNAMIQUE DU CALCUL

On sait depuis Maxwell qu'information et thermodynamique sont intimement liées, notamment par l'entropie qui mesure le désordre d'un système, mais certaines considérations des physiciens se sont révélées précipitées. En 1950, John von Neumann émit l'idée que toute opération binaire de calcul menée à la température T dissipait une quantité d'énergie de $k_B T \ln 2$ (où k_B est la constante de Boltzman qui vaut $1,3805 \times 10^{-23}$ joule par degré Kelvin) accroissant donc l'entropie de $k_B \ln 2$. Cette idée s'est révélée en partie fautive. Les travaux de Rolf Landauer montrèrent en effet que seule l'opération d'effacement (irréversible) d'une information binaire avait un tel coût thermodynamique. Ainsi une porte ET classique (a) dissipe de l'énergie, car elle perd des informations : quand l'état d'une ligne de sortie est 0, on ne peut en déduire l'état des lignes d'entrée. Au contraire (b), la porte logique réversible de Frekin ne dissipe pas l'énergie : deux bits de sortie, les bits de déchets C et D, permettent de faire fonctionner la porte en sens inverse afin de ramener l'ordinateur dans son état initial. Toute opération binaire réversible peut être

ainsi menée avec un coût thermodynamique nul. Complétant ce résultat, il a été établi par Y. Lecerf en 1963, puis indépendamment par Ch. Bennett en 1973, que tout calcul peut être mené de manière réversible, et donc, sans coût thermodynamique. L'inconvénient des calculs réversibles est qu'ils conduisent à accumuler une sorte de déchet d'information : cette accumulation est créée par l'impossibilité de l'effacement qui oblige à conserver des informations parfois devenues inutiles et encombrantes.

Les méthodes de corrections d'erreurs très utilisées aujourd'hui et dont on voit mal comment on pourrait se passer pour mener des calculs fiables sont malheureusement des opérations fondamentalement irréversibles. La raison en est que corriger une erreur c'est l'effacer. S. Lloyd a calculé qu'un ordinateur ultime d'un kilogramme et d'un litre opérant à 10^{51} opérations par seconde (vitesse indépassable) devrait avoir un taux d'erreur inférieur à 10^{-10} pour éviter la surchauffe, mais que même avec ce taux très faible toute l'énergie du système serait dissipée pour opérer la correction d'erreur en moins d'une nanoseconde !



4. L'ORDINATEUR TROU NOIR

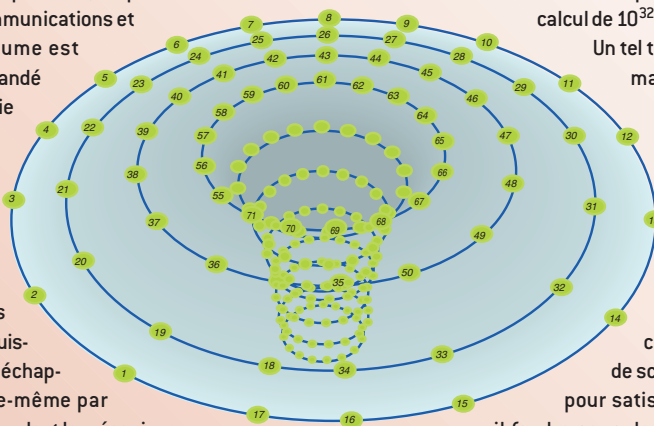
Lorsque l'on souhaite atteindre les limites physiques du calcul, le volume de l'ordinateur est déterminé par l'optimisation des opérations. Si l'on veut mener des opérations en parallèle, les paramètres importants sont la vitesse des communications et la mémoire : aussi un grand volume est préférable. Un petit volume est demandé pour une bonne exécution en série des calculs et une grande densité de mémoire.

Une très forte concentration de matière produit un trou noir et c'est pourquoi S. Lloyd a voulu évaluer les capacités de calcul de ces objets physiques très denses. Cela peut sembler absurde puisqu'aucune information ne devrait s'échapper d'un trou noir : la lumière elle-même par définition ne peut pas le quitter. Cependant la mécanique quantique montre que les trous noirs ne le sont pas complètement et qu'ils s'évaporent, c'est-à-dire émettent des particules, ce qui d'ailleurs

limite leur durée de vie. Utilisant des résultats de Don Page, S. Lloyd évalue qu'un trou noir d'un kilogramme aurait une durée de vie d'environ 10^{-19} seconde et pourrait pendant ce temps mener un calcul de 10^{32} opérations sur 10^{16} bits de mémoire.

Un tel trou noir calculerait donc à la vitesse maximale déterminée par S. Lloyd qui est d'environ 10^{51} opérations par seconde, pour un ordinateur d'un kilogramme. D'autres calculs menés par Y. Jack Ng et utilisant des méthodes différentes, confirment les résultats sur les capacités de calcul des trous noirs.

Bien sûr, l'idée de faire calculer des trous noirs est une idée de science-fiction et n'est envisagée que pour satisfaire la curiosité des théoriciens : il faudra sans doute attendre des décennies, voire des siècles, avant qu'on ne se pose vraiment la question pratique de programmer des trous noirs !



S. Lloyd, s'interrogeant sur un modèle plus raisonnable d'ordinateur d'un kilogramme et d'un volume d'un litre, évoque l'idée d'un stockage, aux températures habituelles, à raison d'un bit par atome (ce qui ne semble pas totalement absurde, car nos technologies permettent déjà de manipuler des atomes un par un) : cela conduirait à une mémoire de 10^{25} bits. Cette mémoire – si l'on se limite à des interactions électromagnétiques entre électrons et atomes – pourrait alimenter un calcul à la vitesse d'environ 10^{40} opérations binaires par seconde, le tout constituant ce qu'on pourrait nommer « l'ordinateur ultime froid ». Pour atteindre les capacités de cette machine, en comptant toujours un ordre de grandeur tous les 5 ans, il ne faudra que 60 ans pour la mémoire et 130 ans pour la vitesse.

Bien sûr, en cours de route des obstacles de toutes sortes seront à surmonter et les chiffres donnés sur ces ordinateurs extrêmes sont uniquement indicatifs de ce qu'on ne pourra pas dépasser quelles que soient les technologies mises en œuvre, y compris si les projets d'ordinateurs quantiques, optiques ou moléculaires aboutissent.

LA CAPACITÉ DE L'UNIVERS

Poursuivant son exploration des limites physiques du calcul et du stockage S. Lloyd, dans un article publié il y a quelques mois, se pose la question grandiose : en considérant que l'univers dans sa totalité mène des calculs, quelle est sa mémoire et combien de calculs a-t-il effectués depuis l'origine des temps, le Big Bang ? Ou ce qui revient au même, pour calculer tout ce qui s'est produit depuis le début du temps, combien faudrait-il d'opérations binaires ?

Pour mener cette évaluation, quelques hypothèses sont nécessaires : nous admettons que le modèle standard du Big Bang est correct. Dans ce modèle, l'âge de l'univers est d'environ 10^{10} ans. L'univers, selon la densité moyenne de la matière, est ouvert (infini en volume et en expansion indéfinie jusqu'à la fin des temps) ou fermé (fini en volume et finissant à terme par se contracter en un instant nommé le Big Crunch qui marque la fin de tout). Même si l'univers est ouvert, nous n'avons accès qu'à une partie finie de l'univers, le reste étant définitivement déconnecté de nous. L'ordinateur géant auquel s'est intéressé S. Lloyd est donc, soit l'univers entier – si l'univers est fermé (et donc fini) –, soit l'ensemble de ce

5. LA SIMULATION D'UN SYSTÈME PAR LUI-MÊME

Les poupées russes emboîtées illustrent les simulations de l'univers dans l'univers lui-même. S. Lloyd a évalué que l'univers depuis le Big bang a effectué un calcul d'environ 10^{120} opérations impliquant au maximum 10^{120} bits de mémoire. La quantité de calculs nécessaire pour simuler l'univers jusqu'à un instant donné est donc finie et une simulation parfaite de l'univers jusqu'à cet instant est envisageable (en théorie) si l'on dispose d'un ordinateur assez puissant. Selon les caractéristiques de l'évolution cosmologique de l'univers – sur lesquelles les spécialistes discutent encore – il est possible ou non de mener un calcul infini dans l'univers futur. Si un tel calcul infini est possible, on peut imaginer utiliser cette capacité pour simuler parfaitement et dans sa totalité l'univers lui-même à partir du Big Bang : les premiers instants demanderaient peut-être des milliards

d'années de calcul, mais chaque instant (avec un décalage de plus en plus grand) serait en définitive simulé. Une telle situation évoque aussi les figures fractales dont certaines parties sont identiques au tout à une échelle réduite, sauf qu'ici l'infini permet à l'univers de posséder une partie qui le reproduit entièrement à l'échelle 1.

L'éventualité d'une simulation parfaite de l'univers en lui-même donne lieu à toutes sortes de situations étranges : lors de la simulation, votre vie sera simulée et donc, en quelque sorte, vous revivrez. Mais dans la simulation, la simulation sera elle aussi simulée et vous revivrez encore au sein de cette simulation dans la simulation. Etc. Au total votre vie se déroulera donc une infinité de fois !



qui se trouve dans la partie accessible de l'univers – si l'univers est ouvert.

Là encore, la mécanique quantique est considérée comme la théorie rendant correctement compte du monde physique et c'est elle qui fixe les caractéristiques de l'univers. Le résultat des calculs de S. Lloyd est que, depuis le Big Bang, cet ordinateur global a effectué un calcul équivalent à environ 10^{120} opérations binaires, et qu'il dispose d'une mémoire de 10^{120} bits (seulement 10^{90} si on se limite aux degrés de liberté contenus dans la matière et l'énergie sans prendre en compte la gravitation). Ces nombres s'expriment uniquement en fonction de l'âge de l'univers (10^{10} ans), et des constantes fondamentales c , h , G . (c est la vitesse de la lumière ; h est la constante de Planck, voir plus haut ; G est la constante de gravitation qui vaut $6,673 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3/\text{kg}\cdot\text{s}^2$).

Pour obtenir des relations simples on introduit le temps de Planck t_p qui est une durée au-dessous de laquelle plus rien n'a de sens physique : $t_p = (Gh / c^5)^{1/2} = 5,391 \cdot 10^{-44}$ seconde. Les limites de l'univers vu comme un ordinateur sont alors :
 – Le nombre d'opérations binaires depuis le Big Bang, $(t / t_p)^2$ est égal à 10^{120} .
 – La mémoire, sans la gravitation, $(t / t_p)^{3/4}$, est égale à 10^{90} .
 – La mémoire en prenant en compte la gravitation $(t / t_p)^2 = 10^{120}$.

Que signifient ces nombres ? S. Lloyd en propose trois interprétations. (a) Ils fixent des bornes à la quantité de calculs qu'on peut attribuer à toute la matière

depuis son origine lorsque l'on interprète tout mouvement et toute évolution comme une opération binaire de calcul. (b) Ils indiquent la quantité d'opérations et de mémoire requise pour qu'un ordinateur puisse simuler l'univers dans sa totalité depuis le Big Bang jusqu'à aujourd'hui. (c) Si l'on accepte de considérer que l'univers est un ordinateur, ces nombres indiquent la caractéristique du calcul qu'il a réalisé (à la question : « Qu'est-ce que calcule cet ordinateur ? », S. Lloyd propose de répondre : la dynamique de l'univers).

L'UTILITÉ DES MATHÉMATIQUES

De tels résultats, s'ils sont confirmés, démontrent d'une manière irréfutable l'utilité du raisonnement mathématique. En effet, imaginons qu'on cherche à prouver que le nombre $n = 2^{1279} - 1$, qui possède 386 chiffres, est un nombre premier (cela peut être utile en cryptographie). Si on utilise la méthode naïve – division de n par tous les entiers de 2 jusqu'à la racine carrée de n en s'assurant de ne jamais trouver un reste nul – alors la taille du calcul dépasse 10^{192} opérations. En effet, il faut faire une division au moins pour chacun des entiers entre 2 et la racine carrée de n , et il y en a plus de 10^{192} . Même si depuis le début des temps l'univers entier s'était consacré uniquement à démontrer que $2^{1279} - 1$ est premier, il n'aurait pas réussi, car sa capacité est limitée à 10^{120} opérations binaires.