

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.