

Procédant comme pour la mémoire, nous avons mené différents raisonnements et utilisé différentes sources d'informations pour produire des estimations variées. Les résultats ne concordent qu'à un ou deux ordres de grandeur près, mais conduisent à affirmer qu'en 2021, on a dépassé 10^{23} opérations par seconde en quantité globale de calcul effectivement mise en œuvre et 10^{24} en capacité globale (non nécessairement active à chaque instant). Un ordre de grandeur au moins sépare donc maintenant mémoire et calcul.

Pourquoi la capacité de calcul s'accroît-elle plus vite que la capacité de stockage ? Plusieurs explications sont possibles.

Du côté des besoins, nous sommes de plus en plus des utilisateurs de calculs dont il n'est pas nécessaire de garder des traces. Ainsi, quand nous parcourons des pages internet, la plupart des informations que l'ordinateur reçoit, manipule (par exemple en préparant les images) et affiche sont rapidement effacées et oubliées, car nous sautons de page en page rapidement jusqu'à trouver ce que nous cherchons. Dans le cas du *streaming* audio ou vidéo, la situation est portée à son comble, car d'un instant au suivant tout est effacé. Déplacer les données, les décompresser et les afficher, tout cela demande du calcul, mais très rapidement la mémoire nécessaire à ces opérations est récupérée et réutilisée. Il en résulte que la pression pour avoir plus de calcul dépasse la pression pour avoir plus de mémoire.

Dans le domaine des algorithmes, de nombreux programmes opèrent massivement des calculs pour ne retenir que le résultat final qui prend peu de place comparé à la taille des calculs menés. Dans le cas de la circulation de l'information sur les réseaux, chaque serveur-relais oublie aussitôt ou assez rapidement la majeure partie de ce qui passe par lui. C'est clair, le développement de l'informatique des réseaux exige bien plus une accélération du calcul qu'une augmentation des capacités de stockage.

LE BITCOIN, UN CAS EXTRÊME

Le cas de la cryptomonnaie Bitcoin est caricatural : le « minage » qui permet d'attribuer les nouvelles unités créées à certains comptes consiste à essayer de produire, quasiment au hasard, une certaine configuration gagnante, comme quand on cherche à obtenir un triple « 6 » avec trois dés en les lançant jusqu'à réussir. L'objectif des « mineurs » de bitcoins est beaucoup plus difficile qu'un triple « 6 » et, chaque seconde, le réseau Bitcoin effectue le lancer des dés numériques environ 10^{20} fois en calculant 10^{20} fois la fonction notée SHA256, dont il efface instantanément le résultat si la configuration attendue n'est pas obtenue, comme quand on ramasse les dés parce que le

3

COMBIEN DE MÉMOIRE AU TOTAL ?

Voici ce qui semble le meilleur raisonnement pour évaluer la mémoire totale des dispositifs électroniques en 2021. On commence par repérer les sources les plus importantes de mémoire de masse créées et vendues en 2021.

Les diverses catégories sont, par ordre d'importance décroissante :

- Les « disques durs » (DD), qui sont des dispositifs de stockage magnétique sur disques rotatifs **A**.
- Les « disques » SSD (*solide state drive*), c'est-à-dire la mémoire de masse sur puces électroniques **B**. Ces « disques » remplacent progressivement les DD, et ils équipent la plupart des nouveaux ordinateurs portables.
- Les mémoires NVM (*non volatile memory*) utilisées pour des accès plus rapides au cœur des ordinateurs.
- Les mémoires optiques (CD, DVD, etc.) **C**, de moins en moins utilisées.
- Les bandes magnétiques, réservées à certains usages professionnels **D**.

D'après le site Datanami (<https://www.datanami.com/2020/02/19/storage-in-the-exabyte-era/>), la partie (a) de la mémoire numérique est la plus importante et représente 60 % de toute la mémoire nouvelle créée en 2021.

Connaître (a) donne donc accès à une évaluation de toute la mémoire créée en 2021. Le site [statista.com](https://www.statista.com/statistics/398951/global-shipment-figures-for-hard-disk-drives/) indique que plus d'un zettaoctet de DD a été fabriqué et vendu en 2020 (<https://www.statista.com/statistics/398951/global-shipment-figures-for-hard-disk-drives/>).

En arrondissant, on arrive à 2,5 zettaoctets pour le total de la mémoire fabriquée et vendue en 2020, et, à quelques pourcents près, à la même valeur pour 2021.

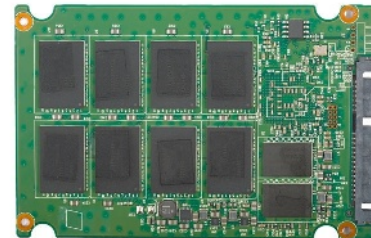
Reste à évaluer la quantité de mémoire produite les années précédentes et encore utilisée en 2021. C'est la partie la plus délicate. Le coefficient à appliquer est certainement situé entre 4 et 10, ce qui conduit donc à une valeur comprise entre 10^{22} et $2,5 \times 10^{22}$ octets pour la mémoire numérique totale sur la planète en 2021.

Le site [import.io](https://www.import.io/post/idc-predicts-the-datasphere-to-reach-160-zettabytes-by-2025/) propose la valeur 7×10^{22} octets et le site [statista.com](https://www.statista.com/statistics/871513/worldwide-data-created/) indique 6×10^{22} pour 2020, mais sans donner de détails sur les raisonnements mis en œuvre pour parvenir à ces chiffres (voir <https://www.import.io/post/idc-predicts-the-datasphere-to-reach-160-zettabytes-by-2025/> et <https://www.statista.com/statistics/871513/worldwide-data-created/>).

A



B



C



D



4

LA CROISSANCE DES RÉSEAUX

L'usage des réseaux s'accroît très rapidement. Voici quelques données qu'avait proposées en mai 2021 le site Alioze (<https://www.alioze.com>).

En 2021, il y a plus de 4,5 milliards d'internautes, dont plus de 50 % sont en Asie. Les appareils mobiles engendrent maintenant près de 60 % du trafic des réseaux, contre 40 % pour les ordinateurs.

On estime qu'il y a plus de 30 milliards d'appareils connectés dans le monde. Le trafic sur internet est, pour plus de la moitié, lié à la vidéo.

Il existe près de 2 milliards de sites internet dans le monde. Les cinq sites les plus visités sont, dans l'ordre : Google, YouTube, Facebook, Baidu, Wikipédia.

Plus de 90 % des requêtes sur moteur de recherche sont adressées à Google, qui répond à 7 milliards de recherches chaque jour.

Il y a plus de 3 milliards d'utilisateurs des réseaux sociaux, dont 2,3 milliards pour Facebook.

Selon les sources, le total du trafic des réseaux (trafic IP) atteint en 2021 entre 5 et 40 zettaoctets.

5

DES CALCULS SANS MÉMORISATION

Les progrès de l'électronique ont multiplié tant les capacités de calcul que celles de mémorisation. Cependant, le calcul a progressé plus vite. Cela est dû aux difficultés techniques à augmenter la mémoire numérique, mais aussi au rôle accru des calculs sans enregistrement.

C'est le cas pour faire circuler de l'information : chaque station relais d'un réseau doit faire certaines opérations pour recevoir et renvoyer une information, mais ne garde pas trace de ce qui circule. De même, quand nous consommons de la musique ou des vidéos en flux continu (*streaming*), nos dispositifs de réception et de décodage calculent beaucoup, mais ne mémorisent rien ou presque.

Le cas le plus extraordinaire de calculs sans mémorisation est celui du minage des cryptomonnaies qui, comme le Bitcoin, utilisent les « preuves de travail ». Les calculs

effectués par les ordinateurs d'un tel réseau servent pour l'essentiel à désigner lequel des ordinateurs recevra les nouvelles unités de monnaie créées. Rien de ce calcul colossal, qui consomme deux fois plus d'électricité que la production de toutes les éoliennes de France, n'est mémorisé.

Le plus absurde dans ces calculs est que la méthode utilisée (la preuve de travail) pour opérer l'attribution des nouvelles unités de monnaie peut être remplacée par une autre méthode dénommée « preuve d'enjeu » qui n'exige aucune dépense massive d'électricité.

Les machines qui effectuent ces calculs sont inutiles et consomment en vain de l'électricité. Si ceux qui possèdent ces machines et qui pourraient remplacer la méthode éternivore par la méthode économe refusent de le faire, c'est uniquement afin de maintenir leurs profits.

«triple 6» n'est pas apparu. Le calcul est colossal. Il est mené en parallèle par des millions de processeurs spécialisés, et le réseau bitcoin ne retient de ce calcul qu'un résultat toutes les dix minutes, résultat qui alors engendre une nouvelle page de 1 mégaoctet (10^6 octets) de mémoire pour chaque validateur. Dans ce cas extrême, la demande en calcul n'a été accompagnée d'aucune, ou presque, demande en mémoire.

LE RAPPORT CALCUL/MÉMOIRE A BEAUCOUP AUGMENTÉ

Nous sommes aujourd'hui dans une situation inverse de celle qui existait avant le xx^e siècle. Les tables numériques de logarithmes, de fonctions trigonométriques, de nombres premiers ou autres étaient par exemple difficiles à obtenir, car les calculs se faisaient à la main. Une fois obtenus, les résultats étaient imprimés, c'est-à-dire enregistrés, un grand nombre de fois : le calcul était plus rare, toutes proportions gardées, que la mémoire.

L'examen du demi-siècle écoulé confirme que la capacité à calculer s'est accrue plus vite que la capacité à mémoriser. C'est la progression faramineuse de nos capacités dans les deux cas qui fait que nous n'avons pas toujours conscience de la différence de vitesse dans les deux domaines. Nous n'avons pas perçu que l'avance de la mémoire a été perdue et que le croisement s'est opéré vers l'année 2000, avec le 10^{20} mentionné quand on utilise comme unités l'octet et l'instruction par seconde.

J'ai effectué un calcul assez simple en comparant deux ordinateurs de bureau de la marque Apple, l'un de 1983 et l'autre de 2015. La vitesse de calcul a été multipliée par $1,7 \times 10^7$, alors que le gain en mémoire rapide (mémoire RAM) n'a été que de $1,6 \times 10^4$ et de 10^5 pour la mémoire de masse sur disque dur.

Une chose amusante confirme encore cette caractéristique de l'évolution technologique. La machine analytique de Charles Babbage, qui était une sorte d'ordinateur mécanique à engrenages conçu au milieu du xix^e siècle, ne faisait qu'une multiplication toutes les 3 minutes et disposait pourtant de l'équivalent en mémoire centrale de plus de 5 kilooctets. Cette machine avait donc un rapport calcul/mémoire inférieur d'au moins 5 ordres de grandeur à celui d'un ordinateur de bureau d'aujourd'hui : toutes proportions gardées, c'est bien le calcul qui a le plus bénéficié des progrès de l'électronique.

Certes, la demande supérieure de calcul explique que les ingénieurs ont cherché à optimiser le calcul plus soigneusement que la mémoire, mais la cause profonde, du moins pour l'évolution récente, est peut-être assez simple et liée directement à la miniaturisation. Quand on augmente le nombre de transistors par centimètre carré sur une puce, on peut