

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.

«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

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 énergivore par la méthode économe refusent de le faire, c'est uniquement afin de maintenir leurs profits.

aussi augmenter leur vitesse de travail, car les distances entre les transistors deviennent plus petites. Ainsi, le nombre de mémoires sur une puce évolue à peu près proportionnellement au nombre de transistors que l'on peut y mettre, en gros selon la loi de Moore de 1975, alors que la puissance de calcul qu'on en tire augmente plus vite que ce nombre de transistors, car elle bénéficie à la fois des progrès en nombre de transistors et en vitesse des processeurs. La vitesse de calcul des puces, mesurée en hertz, a d'ailleurs considérablement augmenté depuis les premiers microprocesseurs. C'est l'explication la plus simple des progrès supérieurs du calcul, comparé au stockage, au cours des cinquante dernières années.

On le voit sur cet exemple, la loi de Moore générale simplifie bien trop les choses et, d'ailleurs, si l'on regarde de près, aucun domaine de l'électronique n'a progressé à un rythme parfaitement régulier. Le cas de la vitesse des processeurs est caractéristique. Elle a progressé de 15% par an de 1978 à 1988, puis de 40% par an de 1988 à 2004, et de seulement 2% par an depuis.

Les capacités de calculs dont nous disposons ont permis le développement des réseaux et en particulier d'internet, et c'est pourquoi une autre mesure est aujourd'hui devenue importante, celle de la circulation de l'information dans les réseaux.

TRAFIC RÉSEAU : LE ZETTA AUSSI

Cette circulation des données a elle aussi atteint l'ordre de grandeur du zettaoctet. Les évaluations des experts n'aboutissent pas au même nombre pour l'année 2021. Ils concluent que le nombre d'octets qui circulent chaque seconde sur les réseaux entre ordinateurs, téléphones, tablettes, box-internet, petits objets connectés, etc. est compris entre 5 et 40 zettaoctets. On peut tout de même en déduire que, comme pour la mémoire, nous en sommes à 10^{22} en ordre de grandeur. Puisqu'il faut bien évidemment exécuter largement plus de 1 instruction pour faire circuler 1 octet d'information entre deux machines d'un réseau, ces évaluations du trafic d'internet confirment que pour le calcul en instructions par seconde, les ordres de grandeur 10^{23} et 10^{24} sont un minimum qui ne fait aucun doute.

Notons que les flux vidéo représentent plus de la moitié de ce trafic. Cela est en grande partie dû à l'explosion récente de la consommation de vidéos par internet, engendrée par le développement de la fibre optique et des offres de YouTube ou Netflix, du «replay» d'émissions télévisées, et plus récemment des visioréunions par Zoom et autres services du même type. L'importance en volume de tout cela écrase les autres types de consommation de la bande passante.

BIBLIOGRAPHIE

Wikipedia, **Zettabyte Era**, consulté en mai 2021 (https://en.wikipedia.org/wiki/Zettabyte_Era).

Ademe, **La face cachée du numérique**, janvier 2021 (<https://bit.ly/3lq6N7A>).

A.-C. Orgerie et L. Lefèvre, **Le vrai coût énergétique du numérique**, *Pour la Science*, n° 518, pp. 48-59, décembre 2020.

Arcserve, **The 2020 Data Attack Surface Report**, 2020 (<https://bit.ly/3jq0KNs>).

Cisco Annual Internet Report (2018-2023), mars 2020 (<https://bit.ly/37oRt2A>).

L. Dedryver, **Maîtriser la consommation du numérique**, Rapport n° 2020-15 de France-Stratégie, octobre 2020 (<https://bit.ly/3fqGz0X>).

J. Hennessy et D. Patterson, **Computer Architecture : A Quantitative Approach**, Elsevier (6^e édition), 2019.

D. Efnusheva et al., **A survey of different approaches for overcoming the processor-memory bottleneck**, *International Journal of Computer Science and Information Technology*, vol. 9(2), pp. 151-163, 2017.

J.-P. Delahaye, **Les chiffres de la complexité informatique**, *Pour la Science*, n° 314, décembre 2003.

Sur ce sujet, il semble que certaines personnes manquent singulièrement de bon sens. Quand vous envoyez un courriel ne contenant que du texte, sauf s'il est très long, vous faites circuler environ un kilooctet de données, alors que lorsque vous parcourez des pages internet en surfant, vous faites circuler des images et aurez rapidement fait se déplacer plus d'un mégaoctet de données. Et cela n'est rien comparé à ce qui se passe quand vous regardez un film en «replay» ou en utilisant un site de vidéo à la demande : en une heure, vous aurez fait circuler un gigaoctet de données au minimum. Il y a donc, en gros, mille fois plus de dépense électrique pour le surf sur internet et un million de fois plus pour une heure de vidéo en flux continu (*streaming*) que pour un courriel.

POUR ÉCONOMISER, REGARDONS MOINS DE VIDÉOS !

À partir de 2009, la presse a largement repris l'affirmation, tombée d'on ne sait où, qu'un courriel ou une requête sur un moteur de recherche dépense autant d'électricité qu'une ampoule allumée pendant une heure. Si c'était vrai, regarder une vidéo de une heure, ce qui demande un million de fois plus de transfert de données qu'un courriel, engendrerait une consommation invraisemblable que ni vous, avec votre facture d'électricité, ni le centre qui gère l'envoi de la vidéo ne pourrait supporter.

D'après un rapport de France-Stratégie (*voir la bibliographie*), le numérique consomme aujourd'hui 4000 térawattheures (TWh) par an dans le monde, alors que la production totale d'électricité est de l'ordre de 26000 TWh par an (un réacteur nucléaire produit environ 8 TWh/an). Certes, le numérique consomme de l'énergie, mais il en fait économiser beaucoup, car envoyer des documents par internet évite l'envoi des mêmes documents par la poste, et les réunions virtuelles évitent de nombreux déplacements.

Ceux qui évitent d'envoyer des courriels ou limitent le nombre de requêtes sur les moteurs de recherche pour éviter de polluer la planète se trompent d'ennemi. S'ils veulent avoir une action sensible, c'est à la vidéo qu'ils doivent penser !

Les chiffres de l'ère numérique du zetta sont le résultat du formidable travail des chercheurs et ingénieurs de l'électronique et de l'informatique. Cela a changé l'univers dans lequel nous vivons et, même si ces chiffres montrent qu'une part importante d'énergie doit être consacrée au monde nouveau et virtuel que nous avons créé, nous devons avoir pleinement conscience de tout ce que cela nous apporte. Par exemple, reconnaissons que la pandémie de Covid-19 aurait été bien plus difficile à vivre sans l'existence des réseaux et leur gigantesque puissance. ■