



HAL
open science

Consommation électrique et efficacité énergétique des infrastructures de calcul

Anne-Cécile Orgerie

► **To cite this version:**

Anne-Cécile Orgerie. Consommation électrique et efficacité énergétique des infrastructures de calcul. Le calcul à découvert, CNRS éditions, pp.248-249, 2025, 9782271153739. hal-04928468

HAL Id: hal-04928468

<https://hal.science/hal-04928468v1>

Submitted on 4 Feb 2025

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Consommation électrique et efficacité énergétique des infrastructures de calcul

Anne-Cécile Orgerie (Univ. Rennes, Inria, CNRS, IRISA)

La performance d'un ordinateur s'exprime en flops, c'est-à-dire en nombre d'opérations en virgule flottante effectuées par seconde. Ce type d'opération s'appuie sur une représentation particulière des nombres (sous forme de mantisse et d'exposant¹) qui permet d'effectuer des calculs efficaces sur de très grands ou très petits nombres. L'architecture matérielle de ces opérations est plus complexe que l'architecture d'opérations similaires sur de simples entiers et requiert plus de transistors.

La performance a été considérablement améliorée au cours des générations successives d'ordinateurs. En 1946, l'Eniac (*Electronic Numerical Integrator And Computer*), premier ordinateur entièrement électronique, était capable de réaliser 5000 additions en 1 seconde et environ 200 multiplications en 1 seconde. Ces opérations n'utilisaient pas des nombres en virgule flottante. En 2023, Frontier, le supercalculateur le plus puissant du monde, est capable d'effectuer $1,194 \times 10^{18}$ flops. Ainsi, en moins de 80 ans, les performances ont été améliorées de 15 ordres de grandeur !

Les environnements logiciels

L'Eniac était initialement programmé par les *Eniac six*, six femmes programmeuses qui devaient notamment exécuter des calculs balistiques commandés par l'armée américaine. Les langages de programmation n'existaient pas encore, elles disposaient uniquement de schémas décrivant les composants électriques de l'Eniac. Elles devaient câbler ces composants pour effectuer les calculs, la reprogrammation (donc le recâblage) pouvant prendre jusqu'à deux jours. L'apparition des langages de programmation a considérablement accéléré la reprogrammation d'un ordinateur. Cependant, cette évolution n'est pas entièrement axée sur la performance, comme énoncé par la loi empirique de Wirth, stipulant que les programmes informatiques ralentissent plus vite que le matériel n'accélère. En effet, la rapidité d'implémentation est souvent privilégiée à l'optimisation des performances. Ainsi, les gains d'efficacité matérielle bruts sont en partie gommés par les implémentations logicielles.

L'amélioration de l'efficacité énergétique

De 1946 à 2023, les puissances électriques n'ont augmenté que de deux ordres de grandeur. En effet, l'Eniac consommait 150 kilowatts, tandis que Frontier consomme 22,7 mégawatts. L'efficacité énergétique (en flops par watt) traduit ce phénomène : les améliorations technologiques ont simultanément bénéficié à la performance et à la consommation énergétique. L'amélioration des

¹ Mantisse et exposant : un nombre réel x est représenté en notation scientifique sous la forme : $x = a \times 10^n$ où a est appelé la mantisse et n est appelé l'exposant.

performances a suivi la loi empirique de Moore, qui prédit, depuis la fin des années 1960, un doublement du nombre de transistors par microprocesseur tous les 2 ans. En parallèle, l'amélioration de l'efficacité énergétique a suivi, des années 1950 aux années 2000, la loi empirique de Koomey : l'énergie nécessaire pour effectuer une quantité donnée d'opérations est divisée par deux tous les 1,57 ans. Ces lois empiriques sont des tendances observées, elles possèdent des limitations connues, notamment une durée de validité limitée, et ne constituent donc pas des prédictions fiables.

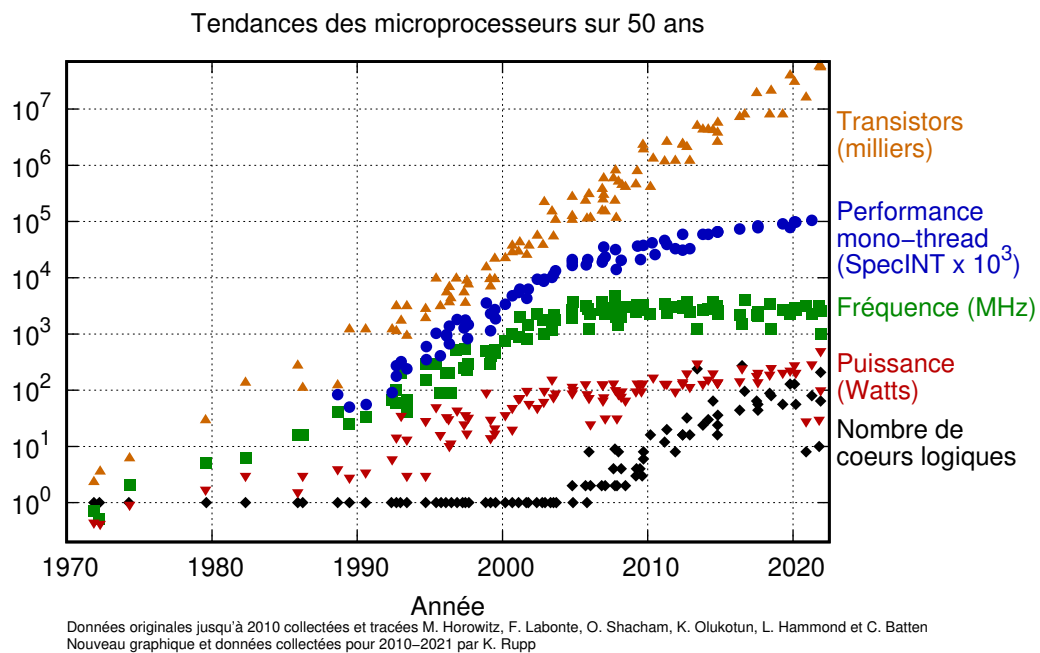


Figure 1. Évolution de l'efficacité énergétique des microprocesseurs qui constituent les unités de calcul des ordinateurs, de 1970 à 2020. [Rupp, 2021] <https://github.com/karlrupp/microprocessor-trend-data>, 2021. La performance mono-thread (sans exploiter le parallélisme des ordinateurs) est calculée en utilisant l'application SpecINT fournie par la *Standard Performance Evaluation Corporation* (SPEC).

Plusieurs mécanismes ont permis l'amélioration de l'efficacité énergétique. De 1970 à 2006, cette amélioration a exploité l'augmentation de la fréquence des processeurs (figure 1) : calculer plus d'opérations par seconde. Cependant, au-delà des 3,5 gigahertz, des problèmes de dissipation thermique apparaissent, menaçant l'intégrité physique du processeur et la fiabilité d'exécution des opérations. À partir de 2006, l'efficacité s'est appuyée sur l'augmentation du nombre de cœurs de calcul par processeur : il s'agit alors d'augmenter le nombre d'opérations qui s'exécutent en parallèle sur un même processeur (multicœurs). Cependant, pour une exécution efficace des applications parallèles, les cœurs doivent être physiquement proches afin que les transferts de données impactent peu les performances. Ceci devient de plus en plus complexe avec l'augmentation du nombre de cœurs, y compris en les disposant en 3 dimensions. Dans le même temps, la finesse de gravure des processeurs s'est accrue pour atteindre 2 à 3 nanomètres au début des années 2020. Mais là encore, les limites de

dissipation thermique se rapprochent dangereusement. En effet, pour chaque processeur, il est possible de calculer son « enveloppe thermique² », qui représente la puissance maximale en Watts qu'il peut dissiper. En cas de dépassement de cette puissance, le matériel peut être endommagé de façon irréversible.

L'augmentation de la consommation énergétique

L'amélioration de l'efficacité énergétique ne garantit pas une réduction de la consommation énergétique des ordinateurs. Au contraire, il s'agit plutôt d'un effet rebond. Ainsi, Frontier consomme autant de puissance qu'environ 42 500 foyers français (d'après les estimations d'Engie en 2022). L'Eniac consommait quant à lui il y a 80 ans autant que 270 foyers français actuels. Et depuis l'Eniac (alors seul ordinateur électronique), le nombre d'infrastructures de calcul et d'ordinateurs a très fortement crû. Un rapport conjoint ADEME-ARCEP paru en 2022 indique que la part du numérique dans la consommation électrique française a atteint 11 % en 2020, soit 52 térawatt-heure (TWh). Ce rapport prévoit pour 2050 une augmentation de 79 % par rapport à 2020. Cette croissance n'est pas compatible avec notre engagement à réduire nos émissions de gaz à effet de serre. En effet, pour se conformer aux accords de Paris de 2015, le numérique devrait, dans son ensemble, au niveau mondial, réduire ses propres émissions de gaz à effet de serre de 42 % d'ici 2030 par rapport à 2020 et de 91 % d'ici 2050.

Les infrastructures de calcul semblent immatérielles et invisibles pour les utilisateurs qui accèdent depuis de nombreux équipements informatiques à la multitude de services numériques rendus disponibles grâce à Internet. Leur consommation énergétique est cependant préoccupante et génère des impacts environnementaux conséquents : émissions de gaz à effet de serre, utilisation de ressources (métaux, eau, terres rares), pollutions, etc. Les améliorations considérables en matière d'efficacité énergétique ont été systématiquement contrebalancées par des effets rebond notamment dus à l'explosion du nombre d'objets connectés. Cette tendance n'est pas soutenable.

Références

[Hartree, 1946] *The ENIAC, an electronic calculating machine*, D. Hartree, Nature 157, 527, 1946.

[Kleiman, 2022] *Proving Ground: The Untold Story of the Six Women Who Programmed the World's First Modern Computer*, K Kleiman, 2022.

[Green500, 2023] *The GREEN500 list*, <https://www.top500.org/lists/green500/2023/06/>, 2023.

² Enveloppe thermique d'un processeur : puissance maximale en Watts qu'un processeur peut dissiper, elle se calcule grâce aux lois de la thermodynamique et aux caractéristiques physiques du processeur (taille de gravure, nombre de transistors, etc.).

[Wirth, 1995] *A Plea for Lean Software*, Computer, vol. 28, no. 02, pp. 64-68, 1995.

[Kooimey, 2011] *Implications of Historical Trends in the Electrical Efficiency of Computing*, J. Kooimey, S. Berard, M. Sanchez, H. Wong, IEEE Annals of the History of Computing, vol. 33, no. 3, pp. 46-54, 2011.

[Engie, 2022] *Quelle est la consommation d'électricité par personne dans un foyer ?*, Engie, <https://particuliers.engie.fr/electricite/conseils-electricite/conseils-tarifs-electricite/consommation-moyenne-electricite-personne.html>, 2022.

[ADEME-ARCEP, 2022] *Évaluation de l'impact environnemental du numérique en France et analyse prospective*, rapport ADEME – ARCEP, 2022.