

NUMÉRIQUE ET ÉLECTRICITÉ : MESURES, PROPORTIONNALITÉ ET EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE

Auteurs et date

- Date de production de la fiche : 30/06/2021
- Laurent Lefevre ; Chargé de recherche chez Inria

MÉTRIQUES ÉLECTRIQUES

Afin d'analyser la consommation électrique des équipements numériques en phase d'usage, il est nécessaire de manipuler deux métriques différentes : la puissance électrique et l'énergie.

PUISSANCE ÉLECTRIQUE

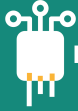
Le watt (W) est l'unité de mesure de la puissance électrique. Cette unité correspond au débit de production ou de consommation de l'énergie. Le nom watt est un hommage à l'ingénieur mécanicien et mathématicien écossais James Watt (1736-1819) qui a travaillé sur l'amélioration des machines à vapeur.

Il est calculé avec la formule suivante : P (puissance en watt) = U (tension en volt) x I (courant en ampère) ². Un watt équivaut à un joule par seconde.

Le joule (J) est une unité permettant de mesurer l'énergie, le travail et une quantité de chaleur ³. Le nom Joule est un hommage au physicien anglais James Prescott Joule (1818-1889) qui a, entre autres, proposé la première loi de thermodynamique.

- Le kilowatt (kW), soit 1 000 watts, est fréquemment utilisé pour les gros serveurs ou les baies de calcul ou de stockage.
- Le mégawatt (MW), soit un million de watts peut être utilisé pour les grands systèmes numériques (de type datacentres ou centres de calcul hautes performances) qui peuvent avoir une puissance de plusieurs dizaines de MW ¹.
- Le gigawatt (GW), soit un milliard de watts est utilisé pour qualifier une production électrique massive. Par exemple, la puissance moyenne de production d'un réacteur nucléaire français est de l'ordre de 1 GW.
- Puis viennent le térawatt (TW, mille milliards de watts), le pétawatt (PW, 10^{15} watts), l'exawatt (EW, 10^{18} watts), le zettawatt (ZW, 10^{21} watts), le yottawatt (YW, 10^{24} watts).

ÉNERGIE ÉLECTRIQUE



Le wattheure (Wh) est une unité de mesure énergétique. Elle permet de mesurer une quantité de travail réalisée sur une période donnée. Un Wh c'est la quantité d'énergie produite en une heure par une machine d'un watt ou la quantité d'énergie consommée en une heure par un système avec une puissance d'un watt.

Il est calculé avec la formule suivante : $Wh : W * h$

- Le kilowattheure (kWh), soit 1 000 wattheures est fréquemment utilisé comme mesure de la consommation des foyers. Votre compteur électrique compte des kWh !
- Le mégawattheure (MWh soit un million de wattheures) peut être utilisé pour quantifier la consommation d'un équipement numérique sur une année. Par exemple, un serveur de calcul alimenté en permanence et qui aurait une puissance constante de 300 watts, utiliserait sur une année 2.628 MWh d'électricité.
- Le gigawattheure (GWh soit un million de kWh) peut être utilisé pour mesurer la consommation de grands systèmes numériques ou la production de centrale électriques. Par exemple, une éolienne de 1 MW de puissance fournirait en moyenne mondiale 2 GWh d'énergie sur une année (2000 heures de vent par an).⁴
- Le terawattheure (TWh) peut être utilisé pour mesurer la production de centrales électriques massives. Par exemple, un réacteur nucléaire français produit de l'ordre de 8 tWh par an.

Ainsi

- une lampe de 60 W qui reste allumée pendant 1 heure consomme $60 \text{ Wh} = 60 * 1$ soit 0,06 kWh
- un four de 900 W qui fonctionne pendant 5 minutes consomme $75 \text{ Wh} = 900 * 5/60$ soit 0,075 kWh²

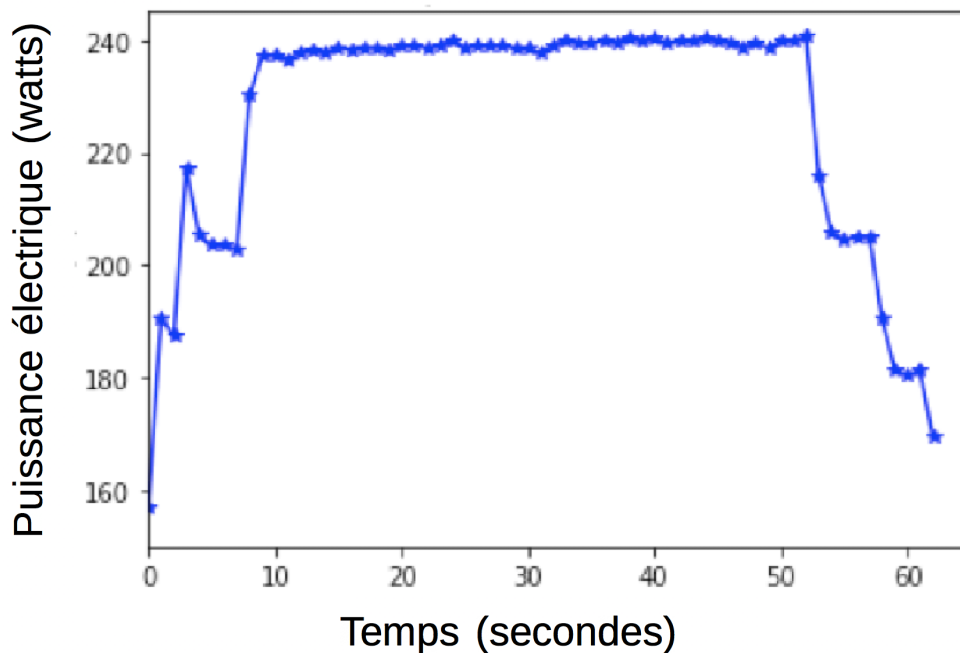
Conclusion, il ne faut pas confondre la puissance électrique (exprimée en watts) avec l'énergie (exprimée en joules ou Wh)².

MESURER LA CONSOMMATION D'UN ÉQUIPEMENT NUMÉRIQUE

Si on désire observer et analyser finement la consommation électrique des équipements informatiques, on ne peut pas se contenter de mesures de type compteur électrique (qui nous donne des kWh). Il faut profiler la consommation électrique pendant une période de temps (dépendant du service rendu). Cette mesure doit être assez fine et précise afin de restituer les variations dues à l'usage de l'équipement.

Ainsi on peut observer la consommation d'un équipement de type ordinateur de bureau lors du lancement d'une application intensive. La figure illustre ce profil énergétique de l'ordinateur en affichant la puissance électrique (watts) et le temps (secondes). On peut observer que cet ordinateur est en attente au début de l'expérience et utilise une puissance

électrique de l'ordre 160 watts. Une fois démarrée l'application, sa consommation augmente pendant le temps de chargement et s'établit ensuite aux alentours de 240 watts.



Consommation électrique d'un ordinateur de bureau (Zoom)

Ce profilage peut être réalisé à l'aide de deux types d'outils :

- outils matériels de type wattmètre : qui mesurent la consommation sur la prise électrique
- outils logiciels : qui estiment la consommation électrique d'applications en fonction de l'usage des ressources internes (nombres d'opérations de calcul, nombre d'accès à la mémoire, nombre d'entrées-sorties...) ou à l'aide de capteurs internes.

PROPORTIONNALITÉ ÉNERGÉTIQUE

On a pu observer dans le profilage de consommation du serveur que cette consommation varie entre 160 watts (quand le serveur est alimenté, le système d'exploitation est en activité, mais aucune application n'est exécutée) et 240 watts (quand une application intensive est en train d'être exécutée sur le serveur). Cette variation reflète une certaine proportionnalité énergétique qui varie en fonction de l'usage de la ressource informatique. Plus on utilise ce serveur plus la puissance électrique utilisée augmente. Malheureusement, lorsque la charge de travail diminue, cette puissance électrique ne tend pas vers zéro watt mais vers une valeur assez haute (160 watts dans notre exemple). En 2007, Luis André Barroso ⁵ a observé la consommation de serveurs dans un datacentre de chez Google et s'est ainsi rendu compte que cette consommation avec une charge de travail proche de 0 tend vers 50% du pic électrique du serveur.

Cette mauvaise proportionnalité énergétique provient des types de consommation qui existent dans une ressource numérique :

- la consommation électrique statique : qui est utilisée par tout ce qui est alimenté de manière fixe dans un équipement numérique : carte mère, ventilateurs, disques durs magnétiques...
- la consommation électrique dynamique : qui dépend de l'usage de l'équipement provoqué par les logiciels exécutés : système d'exploitation, protocoles, services, applications...

Il existe certains cas où la consommation électrique est quasi-constante quel que soit l'usage de l'équipement informatique (par exemple des équipements réseaux filaires tels que des commutateurs réseaux).

EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE

Observer la consommation énergétique d'un équipement ne suffit pas, il faut mettre cette consommation en rapport avec le service applicatif rendu. C'est ce que l'on nomme l'efficacité énergétique (ou efficacité énergétique). L'efficacité énergétique se mesure en usage des ressources (nombre d'entrées-sorties par seconde, nombre de calculs par seconde, nombre de requêtes traitées par seconde) par puissance électrique utilisée ou unité d'énergie consommée.

Par exemple dans le monde des centres de calcul haute performance, le volume de calculs effectués sur des nombres réels par seconde (*floating point operation per second* : *flops*) est le principal indicateur de performance. Plus un système supporte de flops, plus il est rapide et plus théoriquement sa performance est élevée. Ainsi le Top500⁶ répertorie tous les 6 mois, les 500 plus grands centres de calcul haute performance. La métrique de comparaison est le nombre de flops. Par exemple, dans le Top500 de juin 2021⁶, la plus grosse machine est le superordinateur japonais Fugaku qui utilise 7 millions de cœurs de calcul et qui affiche une performance soutenue de 442 Pétaflops. Cette liste ne reflète pas le service rendu par ces machines face à leur consommation énergétique. Ainsi la liste Green 500⁷, propose de trier les 500 plus grands systèmes en fonction d'une métrique d'efficacité énergétique : les flops par watt. Dans la liste de juin 2021⁷, la meilleure machine du Green 500 est la machine MN-3. Elle utilise 1664 cœurs de calcul, est en 335^{ème} position dans le Top 500, et réalise 1.8 Pétaflops de calcul. Cette machine a la meilleure efficacité énergétique. Pour chaque watt d'électricité utilisé par cette machine, 29.7 Gflops de calcul sont réalisés.

SOURCES

-
1. Patrick Eustache et Robert Ferret. Electricité : bases et applications aux datacentres, Cours réalisé pour formation ANF EcoInfo, Septembre 2014 [url](#) ←
 2. Des astuces pour convertir les watts en KWh, Engie, [url](#) ← ← ← |
 3. Définition de Joule [Wikipedia](#) ←

4. Jean-Marc Jancovici. Pourrait-on alimenter la France en électricité uniquement avec de l'éolien ?, Juillet 2014, [url](#) ←
5. Luiz André Barroso et Urs Hölzle. The Case for Energy-Proportional Computing, IEEE Computer, Vol. 40, No. 12, Décembre 2007 [url](#) ←
6. Top 500 : les 500 plus grands systèmes de calcul triés en fonction de leur performance de calcul, Liste de Juin 2021 [url](#) ← ←
7. Green 500 : les 500 plus grands systèmes de calcul triés en fonction de leur efficacité énergétique, Liste de Juin 2021 [url](#) ← ←