

comparatif entre densité de puissance et rendement énergétique

Mark Patrick, Mouser Electronics

Le choix d'une alimentation électrique repose souvent sur un seul critère de rendement tiré de la fiche produit. C'est pourquoi les fabricants font tout ce qu'ils peuvent pour gonfler ce chiffre, notamment en définissant des conditions de mesure toujours plus spécifiques. De leur côté, les concepteurs proposent des topologies plus sophistiquées comme le PSFB (pont complet à décalage de phase) et des convertisseurs LLC. Au niveau des composants, les diodes cèdent le pas aux MOSFET afin de réduire les pertes. Même le silicium est sur la sellette, car les matériaux à large bande interdite tels que le carbure de silicium (SiC) et le nitrure de gallium (GaN) se révèlent plus performants, même à des vitesses de commutation élevées.

L'utilisateur final n'accorde en fin de compte que peu d'intérêt au rendement électrique annoncé sur la fiche technique d'un bloc d'alimentation. Ce qui lui importe le plus, c'est le rendement du système ou des processus et le fait de se conformer aux obligations en matière d'environnement et à ses objectifs financiers, voire de les dépasser. Il apparaît comme de plus en plus évident que pour ce qui est de la protection de l'environnement (et de la maîtrise des coûts), rapporté à l'ensemble de la durée de vie d'un système, le rendement annoncé de l'alimentation électrique ne fait pas tout. Cependant, l'immobilier est un lourd investissement et son entretien coûte cher. Les utilisateurs finaux s'efforceront donc d'intégrer autant d'équipements générateurs de revenus que possible dans l'espace

disponible. De ce fait, ils auront tendance à accorder plus d'importance à la densité de puissance qu'au rendement électrique. Dans le présent article, nous nous pencherons plus en détail sur ces deux paramètres que sont la densité de puissance et l'efficacité énergétique. Nous verrons notamment ce qu'il en coûte pour obtenir une efficacité plus élevée par rapport à l'achat (et, à terme, à la mise au rebut de façon responsable) de solutions énergétiques haute performance. Nous entendons ainsi nous démarquer d'une approche exclusivement axée sur l'augmentation de la densité de puissance et sur les moyens d'améliorer l'efficacité énergétique d'un système. Nous examinerons enfin s'il est pertinent d'accorder la priorité à la gestion de la chaleur plutôt qu'à l'efficacité globale de la conversion d'énergie.

Le concept d'efficacité

L'efficacité ne semble pas être bien compliquée à comprendre : plus sa valeur est proche de 100%, au mieux c'est, n'est-ce pas ? En fait, tout dépend du point de vue adopté. Prenons des bureaux ou un centre de données. Aucun travail pertinent (au sens physique du terme) n'y est réalisé, c'est-à-dire qu'on n'y déplace pas de grosses machines, par exemple. On peut donc attribuer à ces lieux une efficacité de 0%, parce que toute l'énergie consommée s'évapore sous forme de chaleur dégagée par les ordinateurs, les serveurs et les systèmes de stockage et de conversion de puissance. En revanche, si l'on tient compte de l'efficacité en termes de revenus (à savoir, le ratio entre le coût de l'électricité et le montant des revenus générés), l'efficacité peut tout aussi bien s'élever à 1000%. De ce fait, maintenir les coûts de l'électricité aussi bas que possible en réduisant la consommation électrique de chaque unité de production contribue aux performances et à la réussite de l'entreprise.

Le défi des gestionnaires de centre de données consiste à augmenter à la fois la capacité de traitement et de stockage de son centre et les revenus (et donc les bénéfices) générés. Pour ce faire, ils doivent maîtriser les coûts de l'électricité et veiller à ce que le matériel acheté soit rapidement rentabilisé. Ajouter de nouveaux serveurs augmente mécaniquement les frais d'électricité, mais aussi la capacité du centre à générer des revenus. Or, ce rapport entre revenus et coût dépend en bonne partie de l'équipement sélectionné.

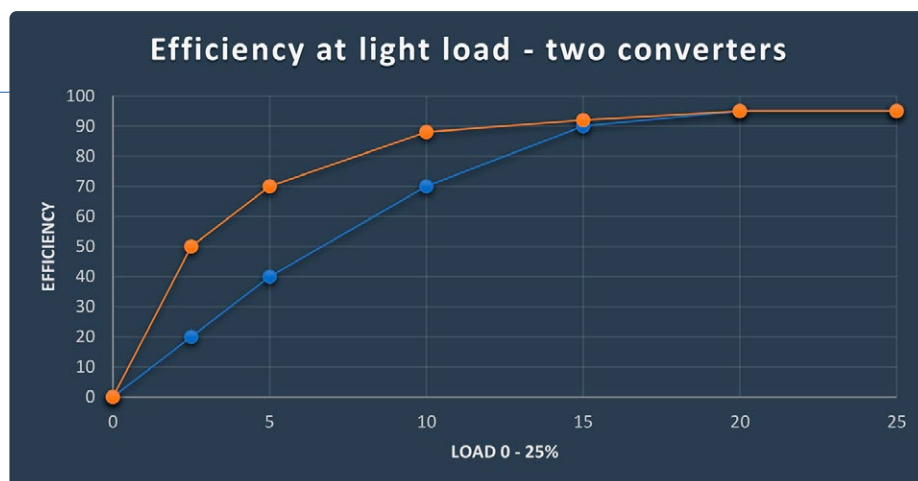


Figure 1. L'efficacité énergétique à faible charge varie considérablement d'un bloc d'alimentation à l'autre.

Dans une usine, la seule raison valable d'ajouter un moteur puissant est de produire des produits qui se vendront mieux. Le système d'entraînement du moteur et l'alimentation électrique associée entrent dans les frais généraux, car ils n'ajoutent à proprement parler aucune valeur commerciale. On peut dès lors considérer que toutes les dépenses liées à l'exploitation (y compris l'électricité) de ce moteur additionnel affectent les résultats nets de l'entreprise. L'efficacité est donc un paramètre important, mais seulement dans le contexte de l'exécution des travaux nécessaires, et en consommant le moins d'électricité possible.

Les pertes sont importantes partout

Dans le domaine de la conception électronique, ce ne sont pas les formules qui manquent : l'efficacité est égale à la puissance en sortie divisée par la puissance en entrée, exprimée en pourcentage ; les pertes sont égales à la puissance en entrée moins la puissance en sortie ; etc. Ces formules n'ont toutefois de sens qu'une fois mises en contexte, en tenant compte par exemple des niveaux de puissance, des conditions d'exploitation et des conditions environnementales. En effet, si la formule est immuable, les fabricants d'alimentation sont libres de l'appliquer dans les conditions d'utilisation qui fourniront le meilleur résultat, ce qui leur permet d'annoncer une efficacité énergétique supérieure à ce qui pourra être atteint en situation réelle. La valeur annoncée est souvent obtenue lorsque le système fonctionne pratiquement à pleine charge. Seulement, peu de systèmes (en particulier dans des applications redondantes) tournent même un certain temps à pleine charge et, en dehors de cette charge optimale, l'efficacité énergétique est généralement bien moins élevée.

Elle aura même tendance à chuter drastiquement à mesure que l'on s'approche de la charge nulle, mais suivant une courbe différente pour chaque bloc d'alimentation. Il en résulte que l'énergie consommée par un serveur en veille peut varier de plusieurs ordres de grandeur d'un serveur à l'autre. Comme le montre la **figure 1**, à 5% de charge, le convertisseur représenté par la ligne bleue dissipe au minimum trois fois plus rapidement la chaleur que le convertisseur représenté par la ligne orange. Le choix d'une alimentation doit par conséquent tenir compte des pertes de charge légère, car elles se ressentent grandement sur la consommation totale d'énergie. Étant donné l'importance du rendement électrique à faible charge, l'initiative 80 PLUS a développé un jeu de normes (voir **tableau 1**) stipulant un rendement minimal sur toute la plage de charge, la plus stricte

étant la norme 80 PLUS Titanium, qui exige un rendement d'au moins 94% à 50% de charge et d'au moins 90% à 10% de charge (sur la base d'un système 115 V). Pour un système 230 V, le rendement attendu s'élève à 96% à 50% de charge (mais demeure 90% à 10% de charge).

Se conformer aux spécifications de la norme 80 PLUS n'est pas une mince affaire, surtout pour ce qui est des niveaux de certification plus élevés, qui ont été introduits après l'élaboration du programme de certification initial en 2004. En effet, si la norme de base exige un rendement de 80% à 50% de charge, atteindre le rendement de 94% exigé par la certification Titanium implique une réduction de 75% des pertes.

Concrètement, pour augmenter son rendement de 14%, un convertisseur de puissance de 1 kW devrait réduire les pertes de 250 W à 64 W. Il va sans dire que modifier la topologie ou la conception existante ne suffit pas à atteindre cet objectif. C'est pourquoi l'industrie a réagi en adoptant des approches innovantes pour y parvenir. Par exemple, les diodes ont été remplacées par des MOSFET à pilotage synchrone. Par ailleurs, les topologies PSFB et LLC pour convertisseurs résonants ont été conçues afin de limiter les pertes de commutation. Enfin, l'utilisation de nouveaux matériaux à large bande interdite permet de réduire les pertes lorsque l'on augmente la fréquence de commutation.

Tableau 1. Aperçu des rendements spécifiés par la norme 80 PLUS pour les systèmes 115 V (Source : Mouser Electronics)

Certification 80 PLUS	115 V interne non redondant				115 V industriel			
% de charge nominale	10%	20%	50%	100%	10%	20%	50%	100%
80 PLUS	---	80%	80%	80%/ PFC 0,9	---			
80 PLUS Bronze	---	82%	85%/ PFC 0,9	82%	---			
80 PLUS Silver	---	85%	88%/ PFC 0,9	85%	80%	85%/ PFC 0,9	88%	85%
80 PLUS Gold	---	87%	90%/ PFC 0,9	87%	82%	87%/ PFC 0,9	90%	87%
80 PLUS Platinum	---	90%	92%/ PFC 0,95	89%	85%	90%/ PFC 0,95	92%	90%
80 PLUS Titanium	90%	92%/ PFC 0,95	94%	90%	---			

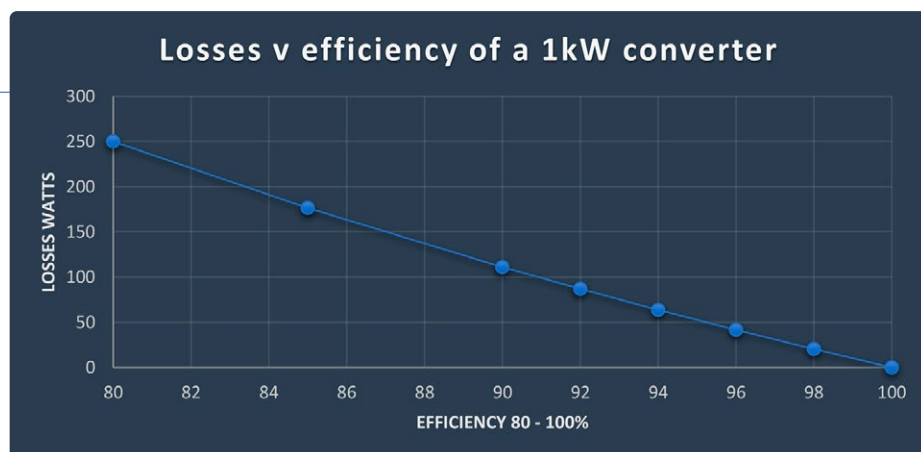


Figure 2. Rapport entre pertes et rendement électriques dans un convertisseur de puissance de 1 kW.

De nombreux convertisseurs nécessitant une conversion en deux étapes (par exemple, correction du facteur de puissance et CC-CC). Dans ce cas de figure, le rendement dans chaque section doit être encore plus élevé. C'est pourquoi les fabricants ont songé à transformer le redresseur à pont de courant alternatif, qui est passé de quatre diodes à un réseau de MOSFET destiné à améliorer l'étage de correction du facteur de puissance.

Seulement, ces technologies sont encore récentes et donc relativement coûteuses. Et cela est sans compter les risques liés à des technologies dont la fiabilité n'a pas (encore) été prouvée par de nombreuses années d'utilisation sur le terrain. Malgré tout, la demande pour des taux de rendement toujours plus élevés (99%, voire plus) va croissante.

1 %, peu et beaucoup à la fois

Plus le rendement est élevé, plus il est difficile de l'améliorer, ne serait-ce qu'un peu. Passer d'un rendement de 97% à 98% nécessite de réduire les pertes d'un tiers. Mieux encore : passer de 98% à 99% implique une réduction supplémentaire de 50% des pertes. Or, réduire les pertes de moitié exigerait sans doute une refonte totale de la conception en s'appuyant sur des techniques plus complexes et des composants plus coûteux, ce qui implique aussi un temps de conception important et des risques accrus. Cette réduction de 50% exigerait presque certainement une refonte totale basée sur des techniques plus complexes et des composants plus coûteux, avec un temps de conception et des risques importants. Prenons l'exemple d'un bloc d'alimentation de 1 kW. Celui-ci dissipe 20,4 W pour un rendement de 98%. Pour atteindre un rendement de 99%, les pertes doivent être réduites à 10,1 W (voir **figure 2**). Dans cet exemple, cela revient à faire peser une

charge financière conséquente sur le coût de la nomenclature par rapport à la durée de vie de l'alimentation, et ce, pour une économie de seulement 10,3 W.

D'aucuns diront peut-être que toute économie d'énergie est bonne à prendre, mais rien n'est moins sûr quand on considère la situation d'un point de vue plus global. Aux États-Unis, l'industrie paie environ 0,165 USD le kilowattheure [1]. Pour un bloc d'alimentation de 1 kW avec une disponibilité de 100%, une réduction de 10,1 W permet d'économiser environ 73 USD sur une durée de vie d'environ cinq ans, alors que la puissance de charge coûte plus de 7 300 USD.

L'acquisition, l'achat et la qualification d'une nouvelle alimentation électrique entraînent de nombreux frais de gestion, auxquels il faut ajouter le coût de la mise au rebut des équipements obsolètes. Les risques associés à un changement d'alimentation ont également un prix. Il paraît très improbable qu'une analyse puisse démontrer que cette économie de 73 USD couvre ne serait-ce qu'une partie de tous les coûts supplémentaires que cela implique, sauf (éventuellement) dans le cas d'une installation utilisant des milliers de blocs d'alimentation identiques. Bref, chercher à obtenir coûte que coûte le rendement le plus élevé fait rarement partie d'une stratégie opérationnelle efficace.

Faut-il s'inquiéter de la chaleur ?

Une entreprise se souciera plus ou moins de la chaleur dissipée par son alimentation électrique en fonction de la source d'énergie utilisée. Si ses équipements et ses systèmes CVC fonctionnent grâce à des sources d'énergie fossiles comme le charbon ou le gaz naturel, cela contribuera naturellement au réchauffement climatique et aux problèmes de pollution. Même les centrales nucléaires, qui produisent pourtant une

énergie dite « propre », émettent de la chaleur dans l'atmosphère, étant donné que leur rendement thermique n'est généralement que de 33 % environ [2].

Améliorer le rendement est clairement une bonne action pour l'environnement. Cependant, même dans les régions chaudes du monde, les particuliers continuent de produire de la chaleur avec leurs chaudières, en prenant des douches et des bains et en faisant fonctionner leurs machines à laver, leurs sèche-linge, etc. On peut dès lors se demander pourquoi des concepteurs s'efforceraient d'économiser quelques dizaines de watts tandis qu'un particulier fait tourner son sèche-linge de plusieurs kilowatts pendant des heures dans le bâtiment voisin. Afin de compenser cette situation, une installation de cogénération (production simultanée de chaleur et d'électricité) peut récupérer la chaleur industrielle résiduelle pour la réacheminer vers des bâtiments résidentiels où elle est réutilisée.

Un des premiers exemples modernes de cogénération est la Pearl Street Station, la toute première centrale électrique construite par Thomas Edison et mise en service en 1882. IBM a appliqué un principe similaire pour construire le centre de données de l'Université de Syracuse [3], dans l'État de New York. Même si cette pratique n'est pas encore courante, l'industrie pourrait bien s'en emparer. Les opérateurs ont tendance à migrer les centres de données dans des régions froides où l'air ambiant peut être utilisé pour refroidir les équipements, mais la chaleur générée par ces centres, pour peu qu'elle soit correctement réacheminée, peut aussi s'avérer très utile sous ses latitudes – et tout particulièrement là où les sources d'énergie hydroélectrique ou géothermique rendent l'électricité bon marché, comme en Norvège ou en Islande.

Fiabilité des impacts thermiques

Réduire les pertes n'est pas une précaution inutile. Au contraire, cela permet de réduire la température interne des équipements, améliore leur fiabilité et prolonge leur durée de vie. Mais cela n'est vraiment pertinent qu'à condition que le boîtier et le système de refroidissement restent inchangés. Diverses formules établissent que la durée de vie des composants électroniques diminue de moitié pour chaque augmenta-

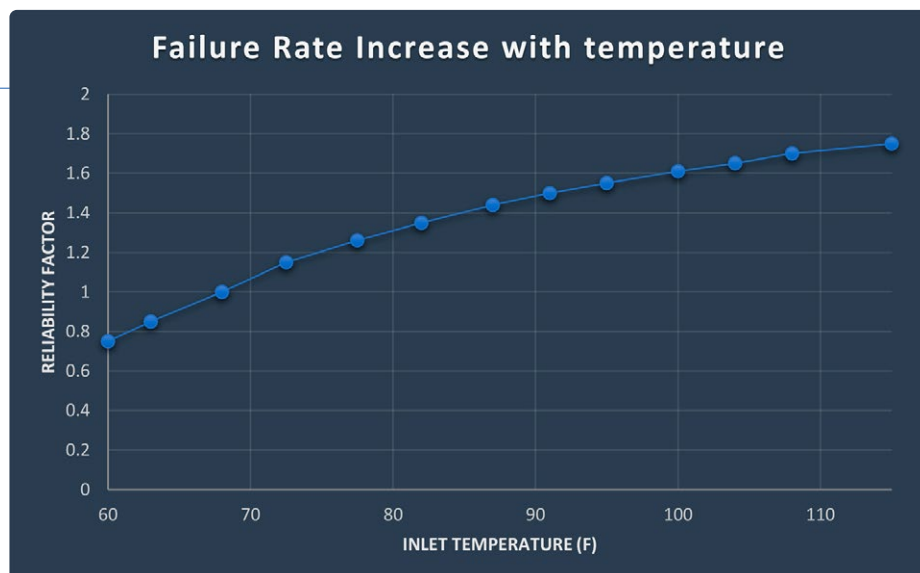


Figure 3. Impact de la température de l'air entrant sur la fiabilité.

tion de 10°C de la température ambiante. Et de nombreux ouvrages sur la fiabilité s'accordent à dire que le taux de défaillance des semi-conducteurs augmente d'environ 25% – et celui des condensateurs d'environ 50% – pour la même augmentation de température.

Les technologies modernes sont généralement très fiables et durables. Malgré ces chiffres alarmants, la fiabilité reste élevée, mais les effets de la chaleur sont réels et ne doivent pas être négligés. Dans les centres de données, on essaie généralement de maintenir l'air entrant à une température d'environ 21°C, mais des recherches menées par Intel et d'autres industriels ont démontré qu'une augmentation de la température n'a pas d'impact significatif sur la fiabilité du matériel. Un rapport du fabricant APC [4] citant l'American Society of Heating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) prévoit qu'une augmentation de la température de l'air entrant de 20°C à 32°C n'entraînerait qu'une augmentation de 1,5 fois du taux global de défaillance des équipements (voir **figure 3**).

Or, chaque degré Celsius supplémentaire autorisé dans les centres de données entraîne une réduction d'environ 7% des coûts de refroidissement associés. Tolérer que les équipements fonctionnent à une température (légèrement) plus élevée apporte donc un réel avantage sur le plan des dépenses d'exploitation.

De plus, les nouveaux composants en matériaux à large bande interdite peuvent supporter des températures de jonction plus élevées que leurs homologues en silicium, ce qui les rend particulièrement adaptés pour faire fonctionner des équipements (en particulier des alimentations haute fréquence) à des températures élevées.

Ce qui importe vraiment, c'est la densité de puissance

Bien souvent, il suffit de réduire la fréquence de commutation pour améliorer le rendement électrique. Seulement, cela implique d'utiliser de plus gros composants passifs et des convertisseurs de puissance plus imposants. Cela aura certes l'avantage de renforcer la fiabilité des équipements en abaissant leur température de fonctionnement, mais cela se fera au détriment de l'espace disponible, ce qui est problématique au niveau du système.

Autoriser une température de fonctionnement plus élevée permet aux ingénieurs systèmes d'intégrer davantage de fonctionnalités dans une même armoire, que ce soit dans un centre de données ou dans un bâtiment industriel, où les boîtiers de taille standard contiennent presque toujours des moteurs et des automates.

Pour éviter de devoir installer une armoire supplémentaire et ainsi réduire les coûts (et l'encombrement) en utilisant une armoire existante, on peut utiliser de nouveaux

convertisseurs de puissance hautes performances avec des facteurs de forme plus petits. De plus, la surface au sol coûte cher et l'on a donc tout intérêt à maîtriser l'emprise au sol des équipements, surtout si l'espace disponible peut être utilisé pour installer des équipements générateurs de revenus.

Résumé

Le choix d'une alimentation électrique ne doit pas s'opérer uniquement sur la base du rendement annoncé par le fabricant. D'autres facteurs entrent en ligne de compte et sont même plus importants : le rendement du système ou des processus, les obligations légales en matière d'environnement et les objectifs financiers, par exemple. Alors que les fabricants s'efforcent d'améliorer le rendement de leurs alimentations électriques à l'aide de nouvelles topologies et de matériaux innovants, les utilisateurs finaux accordent plus d'intérêt à la densité de puissance qu'au rendement, car c'est sur la base de cette donnée qu'ils peuvent optimiser l'espace disponible pour accueillir un maximum d'équipements générateurs de revenus. Le rendement à faible charge est une donnée essentielle que des normes industrielles comme l'initiative 80 PLUS mettent enfin en évidence. Plus le rendement est élevé, plus il devient difficile et coûteux de l'améliorer encore et plus les avantages à le faire sont faibles. Il convient donc d'évaluer le rendement à l'aune du coût global, de la fiabilité et de l'impact sur l'environnement des équipements tout en tenant compte du coût de leur acquisition, de leur mise au rebut et de la gestion de la chaleur. La densité de puissance joue un rôle important, car elle permet d'intégrer davantage de fonctionnalités dans un espace limité, mais aussi de réduire les coûts. En conclusion, le meilleur moyen de prendre des décisions éclairées en matière d'alimentation électrique est d'adopter une approche globale prenant en compte les différents facteurs pertinents. ◀

230708-04

LIENS

- [1] US BLS, "Average Energy Prices for the United States": <https://bit.ly/49KdojU>
- [2] Nuclear Power, "Thermal Efficiency of Nuclear Power Plants": <https://bit.ly/3MW1w4C>
- [3] Data Knowledge Center, "Data Centers That Recycle Waste Heat," 2010: <https://bit.ly/3SRixk0>
- [4] Torell, W., Brown, K., & Avelar, V., "The Unexpected Impact of Raising Data Center Temperatures," 2021: <https://bit.ly/46kn6Xi>