



Data Centres: Digitalisation Powerhouse and Energy Efficiency Potential

Cardoso, Ana; Camarasa Hernando, Clara; Køien, Geir M.; Wang, Xiao; Deschamps, Sophie

Publication date:
2020

Document Version
Publisher's PDF, also known as Version of record

[Link back to DTU Orbit](#)

Citation (APA):
Cardoso, A., Camarasa Hernando, C., Køien, G. M., Wang, X., & Deschamps, S. (2020). *Data Centres: Digitalisation Powerhouse and Energy Efficiency Potential*.

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.



BRÈVE 2

Centres de données : Centres digitaux et potentiel d'efficacité énergétique

MESSAGES CLÉS

- La numérisation de l'économie mondiale et les innovations technologiques telles que l'intelligence artificielle, l'Internet des objets et les chaînes de blocs entraînent une croissance exponentielle de la demande de services des centres de données.
- Les centres de données utilisent environ 200 TWh d'électricité par an, ce qui correspond à environ 1 % de la demande mondiale d'électricité^{iv}.
- Pour freiner la croissance rapide de la consommation d'énergie des centres de données, il est essentiel que la future demande de services des centres de données soit satisfaite par des centres de données efficaces sur le plan énergétique et que leur adoption d'énergies renouvelables soit accélérée.
- Les décideurs politiques doivent établir un mécanisme solide pour collecter des données et publier des statistiques sur l'utilisation de l'énergie des centres de données, comme cela a été fait pour d'autres secteurs à forte consommation d'énergie.



QU'EST-CE QU'UN CENTRE DE DONNÉES?

Un centre de données est un bâtiment dédié, ou une pièce séparée, qui abrite la technologie servant au traitement, au stockage et à la communication des données d'une ou de plusieurs organisationsⁱ. Cet espace est exclusivement utilisé pour le placement du matériel informatique, tel que les équipements informatiques (serveurs), les dispositifs de stockage de données (disques durs et lecteurs de bandes), tous les équipements de réseau (routeurs, commutateurs, modems) pour la communication de données, et l'infrastructure d'alimentation et de refroidissement nécessaire. Le centre de données est également équipé d'une alimentation électrique résiliente, d'une connectivité à haut débit, de systèmes de sécurité sophistiqués et de contrôles pour la gestion du bâtiment, y compris son acclimatation.

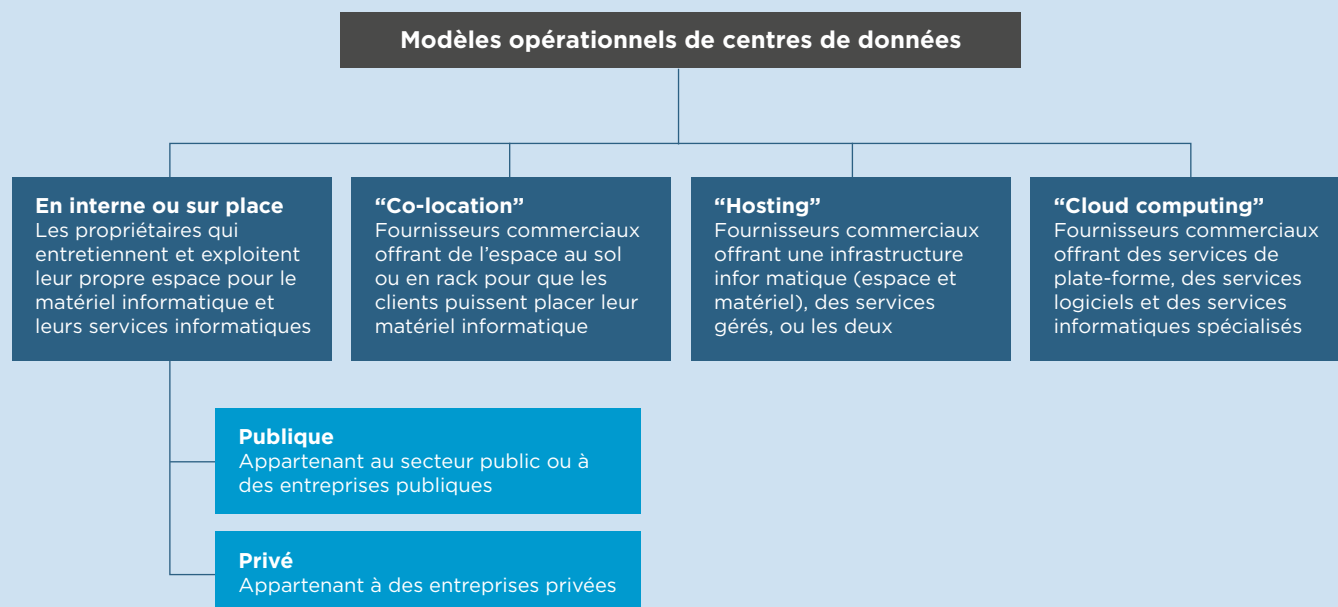
Certaines organisations disposent de salles de stockage où elles gardent un rack avec quelques serveurs, entre autres équipements, mais ce n'est pas considéré comme un centre de données car il ne s'agit pas d'une infrastructure dédiée au traitement, au stockage et à la communication des données.

POURQUOI AVONS-NOUS BESOIN DE CENTRES DE DONNÉES?

Les activités quotidiennes comme lire un courriel, soumettre une déclaration d'impôt, effectuer un virement bancaire, payer une facture, rechercher un mot sur Inter-

net et utiliser un smartphone sont toutes prises en charge par les centres de données. L'économie numérisée et la société en réseau reposent sur les données et la connectivité, qui doivent être gérées de manière sûre et efficace. Les centres de données sont un élément fondamental de l'infrastructure nationale, car les données sous-tendent de nombreuses activités dans les secteurs public et privé. Il n'est pas exagéré de dire que les centres de données permettent des économies de services tout comme, dans le passé, les industries lourdes permettaient des économies industrielles. Dans un monde de plus en plus numérisé, avec une demande croissante de gestion, de traitement et de stockage des données, les centres de données jouent un rôle clé en tant qu'infrastructures de soutien à l'économie numérisée. L'application de l'intelligence artificielle, le déploiement de l'Internet des objets et l'exploitation des cryptocurrencies contribuent à la croissance de la demande de services des centres de données. On estime qu'en 2021, il y aura 7,2 millions de centres de données dans le monde, stockant environ 1,3 Exabytes de données. Cela représente une multiplication par huit de la quantité de données stockées par rapport à 2015, principalement en raison de la croissance du stockage de données volumineusesⁱⁱ.

Figure 1: Modèles opérationnels typiques des opérateurs de centres de données. Création des auteurs basée sur Hintemann (2015)



COMMENT PEUT-ON CARACTÉRISER LES CENTRES DE DONNÉES?

MODÈLES OPÉRATIONNELS DE CENTRES DE DONNÉES

Les centres de données fonctionnent sur la base de deux principaux types d'actifs: (1) l'infrastructure physique, c'est-à-dire les bâtiments et les équipements, et (2) l'offre de services, c'est-à-dire le stockage, la gestion et la maintenance, et la sécurité des données. Ces actifs sont détenus et gérés différemment dans chaque cas, ce qui se traduit par différents modèles d'exploitation (figure 1). Outre les organisations qui choisissent d'avoir leurs centres de données en interne, il existe des fournisseurs commerciaux qui offrent différentes couches de services aux clients.

Les modèles opérationnels les plus courants pour les services de traitement et de stockage des données sont:

- **Centres de données internes** : également appelés centres de données sur site, le principe clé de ce modèle est que l'organisation, qu'elle soit publique ou privée, gère son propre espace pour la technologie de traitement et de stockage des données qu'elle utilise. En règle générale, le département informatique de l'organisation est responsable de tous les aspects de la gestion de l'infrastructure et du centre de données. Les banques commerciales et les télécommunications sont des exemples d'entreprises disposant de centres de données internes.
- **Centres de données en "Co-locations"** : la société d'exploitation du centre de données construit et possède le bâtiment dédié et y loue un espace avec toute l'infrastructure électrique et de refroidissement né-

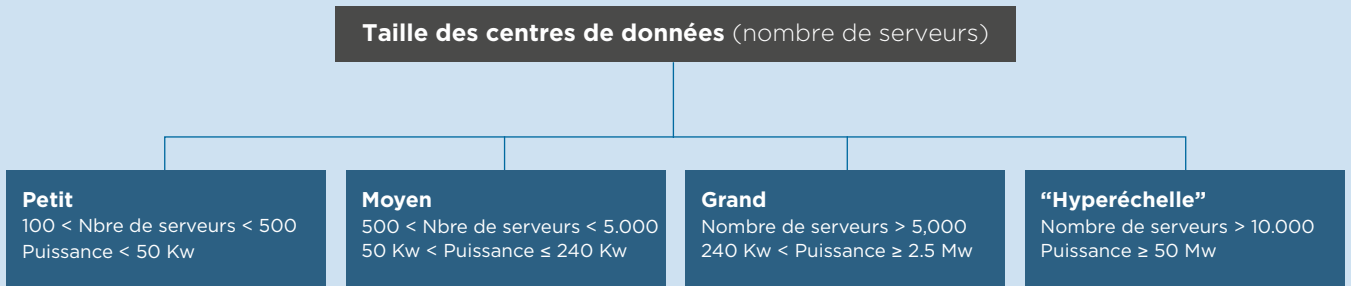
cessaire. Les clients y placent leurs propres serveurs et dispositifs de stockage de données. Outre l'espace, des services supplémentaires peuvent être fournis, comme par exemple la maintenance du matériel informatique et l'interconnexion entre les clients et leurs principaux partenaires. La société de colocalisation garantit la sécurité, la résilience, la connectivité et l'alimentation électrique. Interxion, GlobalConnect, DigiPlex, Digital Realty et Equinix sont des exemples de sociétés offrant des services de colocalisation. Dans le cadre de ce modèle, il existe des centres de données de détail et de gros. La colocalisation de détail consiste à louer un espace dans un centre de données, à savoir un rack, ou espace en rack, ou un espace en cage. Alors que la colocalisation en gros consiste à louer des salles entières ou des bâtiments entiers.

- **"Hosting" en centres de données** : la société d'exploitation du centre de données fournit une variété de services allant des services gérés à l'hébergement. L'éventail des services fournis peut varier : certains opérateurs de centres de données louent tout le matériel informatique pour le traitement, le stockage et la communication des données, et les clients gèrent ce matériel et installent leurs propres logiciels et applications ; d'autres gèrent également le matériel et proposent des ressources informatiques virtualisées ; et d'autres encore exploitent le matériel informatique qui est la propriété de leurs clients (services d'hébergement gérés). Les clients paient pour les services qu'ils utilisent, et ceux-ci sont généralement contractés dans le cadre d'un accord de niveau de service. Ces opérateurs de centres de données peuvent être propriétaires du bâtiment du centre de données ou louer des espaces dans des centres de

Tableau 1. Niveaux de classement des centres de données et leur caractérisation. Source: Pitt et al.ⁱⁱⁱ

Niveau de classement	Temps de fonctionnement	Temps d'arrêt par an (heures)	Type de licenciement
Tier 1	99,671%	28.8	Aucune
Tier 2	99.749%	22	Partiel (composantes N+1)
Tier 3	99.982%	1.6	Tolérance aux pannes (composants 2N+1)
Tier 4	99.995%	0.04	Tolérance aux pannes (composants 2N+1)

Figure 2 : Classification des centres de données en fonction de leur taille (nombre de serveurs). La création des auteurs, basée sur Schomaker et al.^{ix} et Hintemannⁱ



données en colocation. Rackspace et CenturyLink sont des exemples d'entreprises offrant ces services.

- **"Cloud" centres de données** : la société d'exploitation du centre de données construit et gère entièrement le centre de données, y compris toute l'infrastructure et le matériel informatique, et vend aux clients des services liés aux logiciels et aux applications. Les offres de services comprennent les services de plate-forme, de logiciel, d'infrastructure ou des services informatiques sur étagère ou sur mesure. Les clients ne paient que pour les services dont ils ont besoin, et ce modèle est parfois appelé «modèle de paiement à l'utilisation». Parmi les entreprises offrant ces services, on peut citer Microsoft Azure, iCloud d'Apple, Google Cloud Platform, Alibaba Cloud, Oracle Cloud, Amazon Web Services, les services de cloud privé d'IBM, Fujitsu et Atos.

Alors que certains fournisseurs de centres de données fonctionnent uniquement selon l'un des modèles ci-dessus, d'autres offrent une combinaison de services qui combinent des éléments de différents modèles d'exploitation.

NIVEAUX DES CENTRES DE DONNÉES

Les niveaux de centre de données sont un moyen efficace de décrire les composants d'infrastructure utilisés dans le centre de données d'une entreprise. Bien qu'un centre de données de niveau 4 (tier 4) soit plus complexe qu'un centre de données de niveau 1 (tier 1), cela ne signifie pas nécessairement qu'il est le mieux adapté aux besoins des entreprises.

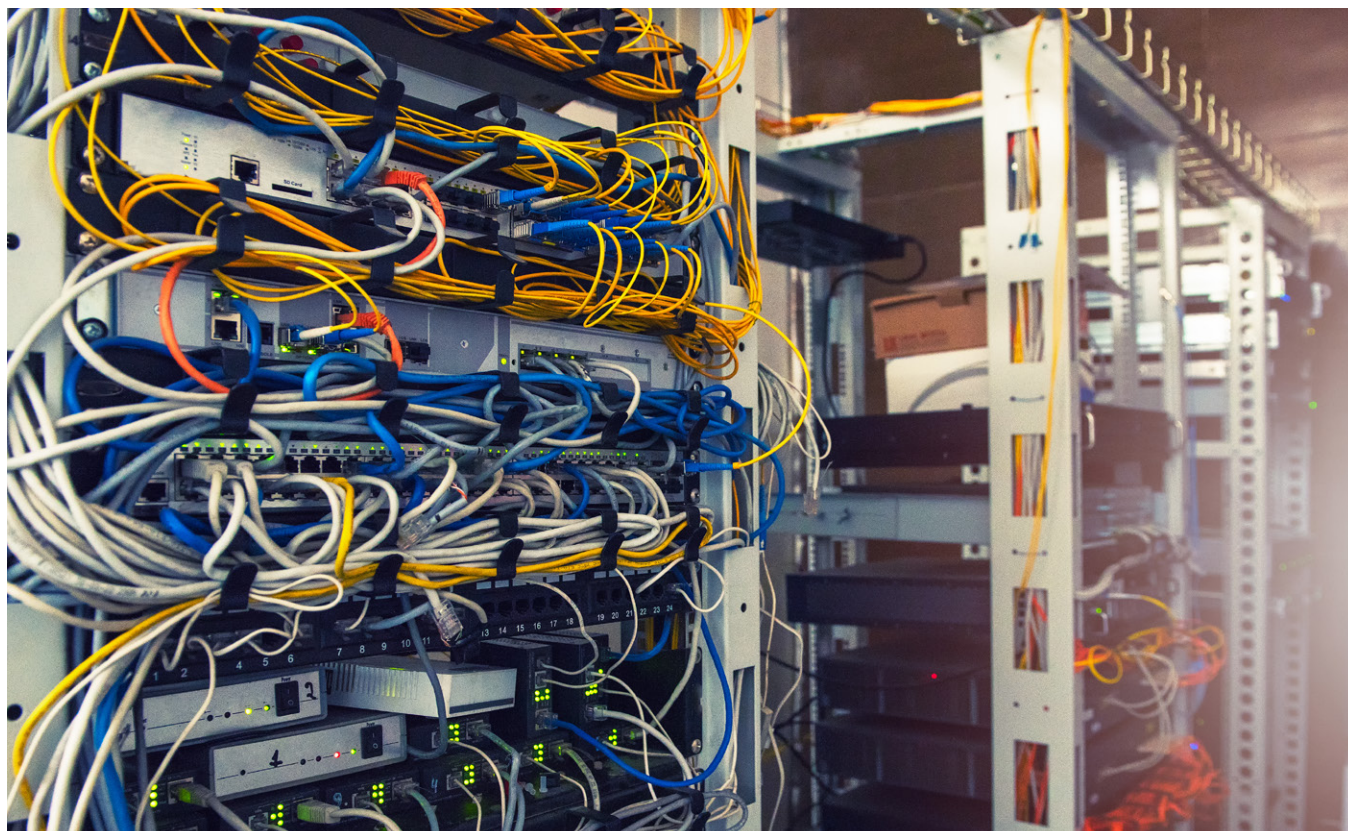
TAILLE DES CENTRES DE DONNÉES

Une autre façon de caractériser les centres de données est de les caractériser en fonction de leur taille, c'est-à-dire en considérant le nombre de serveurs qu'ils contiennent ou l'espace occupé par le bâtiment ou la salle du centre de données. Ils peuvent aller d'une petite taille, contenant moins de 500 serveurs, à un centre de données de très grande échelle, contenant plus de 10 000 serveurs (figure 2).

Malgré la tendance d'agrandissement des centres de données, en accord avec l'augmentation continue de la demande de services des centres de données, les petits centres de données ne disparaîtront pas. En fait, le nombre de petits centres de données devrait augmenter parce que les centres de données de pointe (ou informatique de pointe) deviennent plus pertinents et nécessaires dans le contexte des développements technologiques tels que l'Internet des objets et les villes intelligentes, qui nécessitent un traitement local des informations et des exigences très strictes en matière de latence dans la communication des données.

QUELLE EST LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE D'UN CENTRE DE DONNÉES ?

On estime que les centres de données représentent environ 1 à 1,5 % de la consommation totale d'énergie dans le monde, ce qui correspond à environ 200 TWh d'électricité^{iv}. Bien que la taille totale des données stockées dans les centres de données ait connu une augmentation rapide au cours de la dernière décennie, la consommation



énergétique globale des centres de données n'a augmenté que modestement grâce à l'intégration de mesures d'efficacité énergétique. En effet, alors que la consommation d'énergie a augmenté de 6 % entre 2010 et 2018, le nombre d'instances informatiques dans les centres de données a augmenté de 550 %ⁱⁱⁱ. L'amélioration de l'efficacité des processeurs et des disques de stockage, la gestion efficace des serveurs par la virtualisation et la consolidation, et le passage continu des centres de données traditionnels à des centres de données en nuage plus efficaces sur le plan énergétique ont contribué à ce découplage entre la croissance de la consommation d'énergie et la croissance des instances informatiques. Toutefois, pour contrôler la consommation d'énergie des centres de données, il est essentiel de s'assurer que la demande future de services des centres de données sera satisfaite par des centres de données efficaces sur le plan énergétique qui intègrent des sources d'énergies renouvelables.

Les centres de données sont des bâtiments très gourmands en énergie qui nécessitent 10 à 100 fois plus d'électricité par surface de plancher que les autres types de bâtiments commerciaux. La demande d'électricité d'un centre de données se répartit en quatre composantes principales^v:

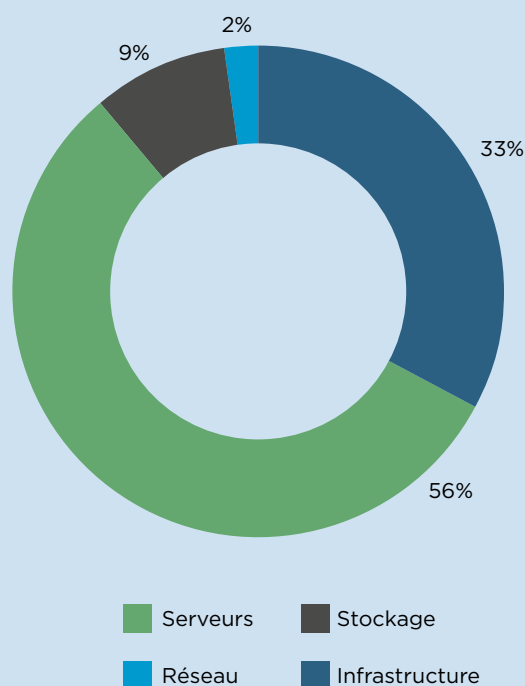
- **Infrastructure** : L'infrastructure est ce qui soutient le fonctionnement des équipements informatiques. Elle comprend les équipements de refroidissement, de distribution d'énergie, d'éclairage et de sécurité, les batteries de secours et les générateurs. L'efficacité de l'infrastructure est mesurée par l'efficacité de l'utilisation de l'énergie (PUE)ⁱ, qui représente la consommation

totale d'énergie du centre de données par rapport à la consommation d'énergie de l'équipement informatique^{iv}. Une valeur PUE proche de 1 indique une grande efficacité de l'infrastructure de soutien, où presque toute l'électricité consommée au centre de données est consacrée à l'équipement informatique. Malgré la large utilisation de cette mesure dans l'industrie, elle est cependant inadéquate pour saisir l'efficacité d'un centre de données car elle n'indique rien sur l'efficacité des équipements informatiques et la performance du centre de données (par exemple le nombre de calculs) par rapport à sa consommation d'énergie^{vi}.

- **Serveurs** : Les serveurs sont généralement la composante informatique qui consomme le plus d'énergie dans un centre de données. La consommation d'énergie des serveurs est en partie liée à leur utilisation. La plupart des serveurs fonctionnent en dessous de leur capacité de puissance maximale. La consolidation des serveurs, c'est-à-dire le remplacement de plusieurs serveurs fonctionnant à faible capacité par un seul serveur consolidé fonctionnant à plus forte capacité, est une mesure clé pour l'amélioration de l'efficacité énergétique^{iv}.
- **Lecteurs de stockage** : Le stockage dans un centre de données comprend le stockage sur disque dur et des dispositifs à semi-conducteurs, qui ont une consommation d'énergie différente^{iv}. Les disques durs consomment généralement plus d'énergie, mais l'innovation continue fait baisser leur consommation d'énergie, en convergence avec les valeurs des disques durs à semi-conducteurs.

ⁱ PUE est un indicateur d'efficacité énergétique (en anglais PUE ou Power Usage Effectiveness) mis au point par le Green Grid pour mesurer l'efficacité énergétique d'un centre de données.

Figure 3: Part de la demande d'énergie par différents composants dans les centres de données au niveau mondial (2020). Élaboré à partir de données de International Energy Agency^{vi}



- **Matériel de mise en réseau :** La consommation d'énergie des équipements de réseau est la moins importante parmi les équipements informatiques d'un centre de données. La tendance vers une plus grande utilisation des réseaux mobiles pourrait avoir un certain impact sur ce point car l'intensité électrique des réseaux mobiles est plus élevée que celle des réseaux fixes. Bien que les réseaux 4G et 5G soient moins gourmands en énergie que les réseaux 3G, la vitesse de transmission de données plus élevée qu'ils permettent peut entraîner des volumes de trafic plus importants dans les réseaux mobiles^{vi}.

La figure 3 montre la contribution relative de chaque composante à la demande globale d'électricité par les centres de données dans le monde en 2020, sur la base des données publiées par l'Agence internationale de l'énergie (2019)^{vii}.

COMMENT LE CENTRE DE DONNÉES UTILISE-T-IL L'ÉNERGIE DANS SES ACTIVITÉS ?

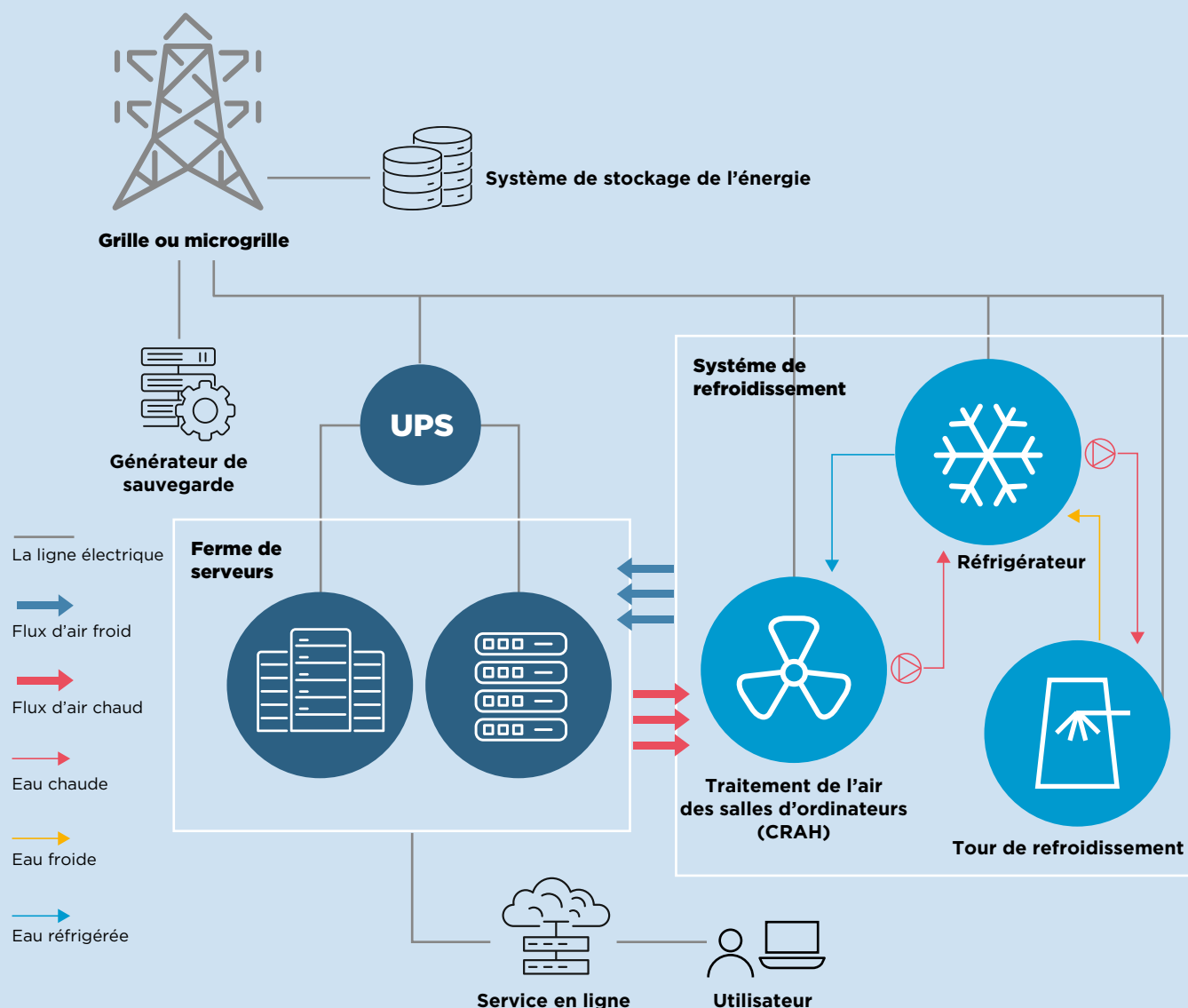
D'un point de vue global, les centres de données utilisent l'énergie à tous les stades de leur cycle de vie, à savoir dans les phases de construction, d'exploitation et de recyclage. Cette section se concentre sur l'utilisation de l'énergie des centres de données dans la phase d'exploitation. Un centre de données exploite différents types d'équipements, qui ont tous besoin d'électricité. En général, les centres de données comprennent les équipements suivants^{viii}:

- **Fermes de serveurs :** des équipements permettant de traiter et de stocker des données, à savoir des grappes de serveurs interconnectés, empilés dans des racks ou des armoires fermées
- **Mise en réseau et communication :** des équipements permettant de maintenir une communication de données à haut débit, notamment des routeurs, des commutateurs et du câblage
- **Distribution de l'électricité :** des équipements pour fournir l'électricité au centre de données
- **Production d'électricité de secours :** des équipements permettant d'assurer une alimentation électrique de secours en cas de défaillance du service public
- **Stockage de l'énergie :** des systèmes de batteries pour fournir instantanément de l'électricité pendant le délai de démarrage de l'alimentation de secours
- **Système de circulation de la chaleur et de l'air :** pour s'assurer que la température ambiante autour des serveurs se situe dans la plage appropriée. Le flux d'air dans les centres de données est organisé de manière à former des allées d'air chaud et des allées d'air froid. Le système de flux d'air et de chaleur doit extraire l'air chaud des équipements et distribuer l'air froid. Les systèmes de chauffage et de circulation d'air les plus courants sont le CRAH (Computer Room Air Handling) et le CRAC (Computer Room Air Conditioning)
- **Système de refroidissement :** des équipements pour refroidir l'air soufflé dans les allées d'air froid du centre de données. Ce système est généralement utilisé en conjonction avec les unités CRAH (Computer Room Air Handling), car les climatiseurs des salles informatiques utilisent leurs propres condenseurs pour réduire la température de l'air
- **Système de contrôle et de sécurité :** des équipements permettant de contrôler et de gérer le flux d'énergie, de prendre des décisions critiques en cas d'urgence et de garantir la sécurité des données stockées

Un centre de données peut être considéré comme un système de conversion d'énergie qui consomme de l'énergie électrique et la transforme en chaleur. Le centre de données est un système fermé dans lequel les seules connexions avec le monde extérieur sont l'énergie électrique et l'Internet. La figure 4 montre une exemple d'interconnexion des composants d'un centre de données, dans lequel le système de refroidissement est un refroidisseur d'eau.

Les centres de données sont principalement concernés par la sécurité et la disponibilité de leurs services^{ix}. La sécurité signifie que les opérateurs de centres de données doivent empêcher les activités en ligne malveillantes, réduire au maximum la possibilité d'effractions physiques et minimiser l'impact des catastrophes naturelles et d'une éventuelle utilisation abusive par du personnel non qualifié. La disponibilité signifie qu'il faut réduire au maximum l'impact

Figure 4. Architecture of a typical data centre cooled by a water chiller. Source: Adapted from Rahmani et al.^{vii}



des pannes de courant, des défaillances matérielles et des défauts similaires afin d'éviter les interruptions de service. Pour répondre à ces questions, les centres de données ont besoin d'une combinaison de systèmes redondants pour tous les types d'équipements qu'ils utilisent. Ces systèmes redondants s'additionnent en termes de demande énergétique globale pour le centre de données. Le niveau de redondance et de sécurité d'un centre de données est décrit par sa valeur de niveau : plus la valeur de niveau est élevée, plus le niveau de sécurité et de disponibilité qu'il peut fournir est élevé.

COMMENT AUGMENTER L'EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE DES CENTRES DE DONNÉES ?

Compte tenu de la demande croissante en énergie des centres de données et de leur rôle clé dans la numérisation de l'économie, les efforts visant à assurer le développement durable des centres de données sont une considération primordiale. Ces efforts portent principalement

sur l'amélioration de l'efficacité énergétique en cours d'exploitation, notamment en ce qui concerne les équipements informatiques, le système de refroidissement et le système d'alimentation électriqueⁱⁱⁱ. Parmi les exemples de ces efforts figurent la consolidation des serveurs, le remplacement des puces et des serveurs pour gagner en efficacité opérationnelle, l'utilisation de la chaleur des serveurs pour le chauffage urbain, l'utilisation du refroidissement libre à base d'air et d'eau, le passage à des systèmes à très grande échelle, le refroidissement des serveurs avec des matériaux isolants et le recours à l'intelligence artificielle pour réguler le système de refroidissement du centre de données^x. Par ailleurs, la lutte contre la pénurie de matériaux peut consister à améliorer l'efficacité des matériaux lors de la fabrication des équipements ou à renforcer la réutilisation et le recyclage des matériaux en fin de vie des équipements^{xi}.

Au-delà de l'efficacité énergétique, les grands acteurs du secteur des TIC, tels que Google, Microsoft et Facebook,

REMERCIEMENTS

AUTEURS

Ana Cardoso

Chercheur, UNEP DTU Partnership

Clara Camarasa

Chercheur post-doc, Copenhagen Centre on Energy Efficiency, UNEP DTU Partnership

CONTRIBUTEURS

Geir M. Kjøien

Professeur en Cybersecurity, University of South-Eastern, Norway

Xiao Wang

Programme Officer, Copenhagen Centre on Energy Efficiency, UNEP DTU Partnership

Sophie Deschamps

Responsable Marketing Produit, Schneider Electric

Le Centre de Copenhague sur l'efficacité énergétique (Copenhagen Centre on Energy Efficiency) est la plateforme thématique mondiale axée sur l'efficacité énergétique au sein de l'initiative « L'Énergie Durable pour Tous » (SEforALL), et participe directement à soutenir l'objectif du SEforALL de doubler le taux mondial d'amélioration de l'efficacité énergétique d'ici 2030.

Le Centre de Copenhague remplit sa mission à travers :

- aider au changement de politique dans les pays et les villes, grâce à des connaissances, des idées et un soutien technique
- accélérer l'action par l'innovation dans le développement et le financement des projets
- faire mieux connaître l'efficacité énergétique en communiquant les réussites et en soutenant les actions de sensibilisation.

Pour plus d'informations, veuillez consulter le site www.energyefficiencycentre.org ou nous contacter à l'adresse suivante c2e2@dtu.dk.

En ce qui concerne notre travail dans les centres de données durables et l'énergie intelligente, veuillez contacter Xiao Wang à xwang@dtu.dk

Visitez le système de gestion des connaissances du Centre de Copenhague à l'adresse suivante kms.energyefficiencycentre.org

Le Centre de Copenhague sur l'efficacité énergétique fait institutionnellement partie du partenariat DTU du PNUE (UDP). L'UDP est un centre de collaboration des Nations unies pour l'environnement et un centre international de recherche et de développement de premier plan. Institution consultative sur l'énergie, le climat et le développement durable.

ont également commencé à accroître l'utilisation des énergies renouvelables qui alimentent le fonctionnement de leurs centres de données grâce, par exemple, aux photovoltaïques ou aux éoliennes. À cette fin, un facteur critique dans le choix de l'emplacement d'un centre de données est le contenu en énergie renouvelable de l'approvisionnement énergétique, la stabilité du réseau électrique et la température ambiante annuelle moyenne.

Cependant, des compétences beaucoup plus élevées en matière de données publiques et de modélisation sont nécessaires pour surveiller la consommation d'énergie des centres de données afin d'élaborer et d'évaluer des politiques fondées sur des preuves. Les décideurs politiques nationaux devraient donc désigner des systèmes de collecte de données solides et des systèmes de dépôt de données ouverts. Ces efforts sont particulièrement importants compte tenu des projections de croissance de la consommation d'énergie des centres de donnéesⁱⁱⁱ.

REMERCIEMENTS

- Hintemann, R. (2015). Consolidation, colocation, virtualisation, and cloud computing: The impact of the changing structure of data centers on total electricity demand. In L. M. Hilty & B. Aebischer (Eds.), *Advances in Intelligent Systems and Computing* (Advances i, Vol. 310, pp. 125–136). https://doi.org/10.1007/978-3-319-09228-7_7
- Statistics from <https://www.statista.com>
- Pitt, W., Iv, T., Seader, J. H., & Brill, K. G. (2001). Industry Standard Tier Classifications Define Site Infrastructure Performance. The Uptime Institute.
- Masanet, E., Shehabi, A., Lei, N., Smith, S., & Koomey, J. (2020). Recalibrating global data center energy-use estimates. *Science*, 367(6481). <https://doi.org/10.1007/s12053-019-09809-8>
- Shehabi, A., Smith, S. J., Masanet, E., & Koomey, J. (2018). Data center growth in the United States: decoupling the demand for services from electricity use. *Environ. Res. Lett.*, 13, 124030. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaec9c>
- Shehabi, A., Smith, S., Horner, N., Azevedo, I., Brown, R., Koomey, J., ... Sartor, D. (2016). United States Data Center Energy Usage Report. Retrieved from <https://eta.lbl.gov/publications/united-states-data-center-energy>
- IEA (2019), Tracking Buildings, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/tracking-buildings-2019/data-centres-and-data-transmission-networks#abstract>
- Rahmani, R., Moser, I., & Seyedmahmoudian, M. (2018). A complete model for modular simulation of data centre power load. *arXiv preprint arXiv:1804.00703*
- Schomaker, G., Janacek, S., & Schlitt, D. (2015). The Energy Demand of Data Centers. In L. M. Hilty & B. Aebischer (Eds.), *ICT Innovations for Sustainability* (Advances i, pp. 113–124). https://doi.org/10.1007/978-3-319-09228-7_6
- Huusko, J., de Meer, H., Klingert, S., & Somov, A. (Eds.). (2012). Energy Efficient Data Centers. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-33645-4>
- Laurent, A., and Dal Maso, M. (2020). Environmental sustainability of data centres: A need for a multi-impact and life cycle approach. Data Centre Brief Series. Copenhagen Centre on Energy Efficiency.