



Environmental sustainability of data centres: A need for a multi-impact and life cycle approach

Laurent, Alexis; Dal Maso, Mirko; Wang, Xiao; Zhu, Xianli; Prata Dias, Gabriela

Publication date:
2020

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

[Link back to DTU Orbit](#)

Citation (APA):
Laurent, A., Dal Maso, M., Wang, X., Zhu, X., & Prata Dias, G. (2020). *Environmental sustainability of data centres: A need for a multi-impact and life cycle approach*.

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.

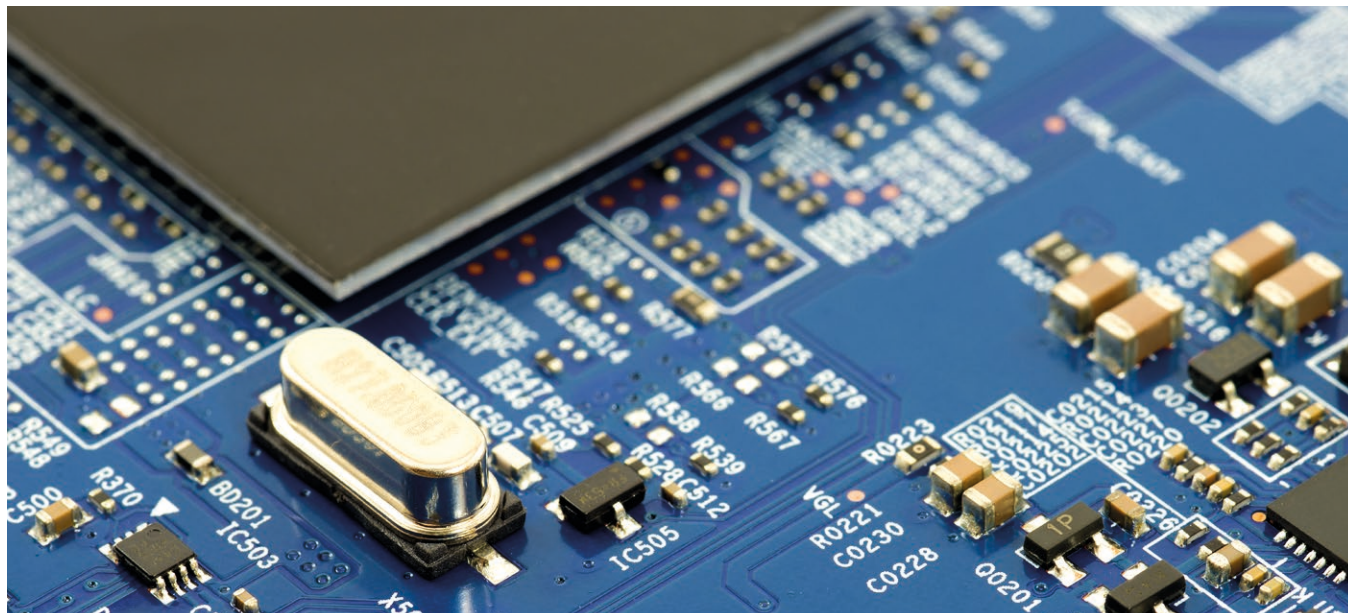


BRÈVE 1

Durabilité environnementale des centres de données: La nécessité d'une approche multi-impact et cycle de vie

MESSAGES CLÉS

- Les préoccupations concernant l'utilisation de l'énergie des centres de données et les impacts associés sur le changement climatique ont donné lieu à des efforts pour réduire la demande en énergie des centres de données pendant leurs opérations.
- L'accent mis sur la réduction des impacts liés au changement climatique découlant des opérations des centres de données peut induire le risque de négliger d'autres impacts environnementaux provenant de différentes étapes du cycle de vie, notamment l'extraction des matières premières, la fabrication des équipements, la construction des centres de données, ou encore la fin de vie des équipements et des bâtiments des centres de données.
- Pour soutenir la conception de centres de données véritablement durables, des évaluations plus complètes de la durabilité environnementale, englobant l'ensemble du cycle de vie et prenant en compte un large éventail de problèmes environnementaux, sont nécessaires.
- Ce numéro utilise des exemples pour montrer les impacts environnementaux substantiels des centres de données provenant d'autres étapes du cycle de vie que leurs opérations et appelle à l'utilisation de l'analyse du cycle de vie (ACV) pour évaluer et traiter ces impacts de manière quantitative.



1. CONTEXTE : L'IMPORTANCE CROISSANTE DES CENTRES DE DONNÉES DANS LA SOCIÉTÉ

Au cours des deux dernières décennies, la dépendance des sociétés à l'égard des technologies de l'information et de la communication (TIC) a augmenté de manière exponentielle. Le trafic Internet seul est passé de 60 PB en 1997 à 1,1 ZB en 2017 (c'est-à-dire avec un facteur de croissance de 20,000)ⁱ. Par analogie avec le corps humain, les principaux composants des TIC comprennent les centres de données, qui peuvent être assimilés à leurs cerveaux, tandis que les réseaux et les appareils grand public peuvent être considérés comme le squelette et les bras des TIC. Les centres de données assurent la fonction clé de stockage, de sauvegarde et de traitement des données. Suite à la croissance et à la diversification des TIC, ils sont passés d'installations informatiques d'entreprise, composées de quelques serveurs dans un placard, à des systèmes hyper dimensionnels de centaines de milliers de mètres carrés fournissant le support nécessaire à la croissance exponentielle de l'internet, des médias sociaux et des générations successives de dispositifs électroniques.

Selon les estimations actuelles, les centres de données utilisent environ 200 TWh d'électricité par an, ce qui représente environ 1 % de la demande mondiale en électricité. D'ici 2030, on prévoit que les TIC représenteront plus de 20 % de la demande mondiale d'électricité, dont un tiers provenant des seuls centres de données.ⁱ Le rôle important des centres de données dans les sociétés futures et leur forte demande énergétique exigent des actions urgentes pour traiter leur durabilité environnementale, non seulement par leur contribution au changement climatique mais aussi par celle liée à d'autres problèmes environnementaux, comme l'épuisement des ressources. De telles mesures sont essentielles pour anticiper et assurer

un développement écologiquement durable des centres de données sur le long terme.

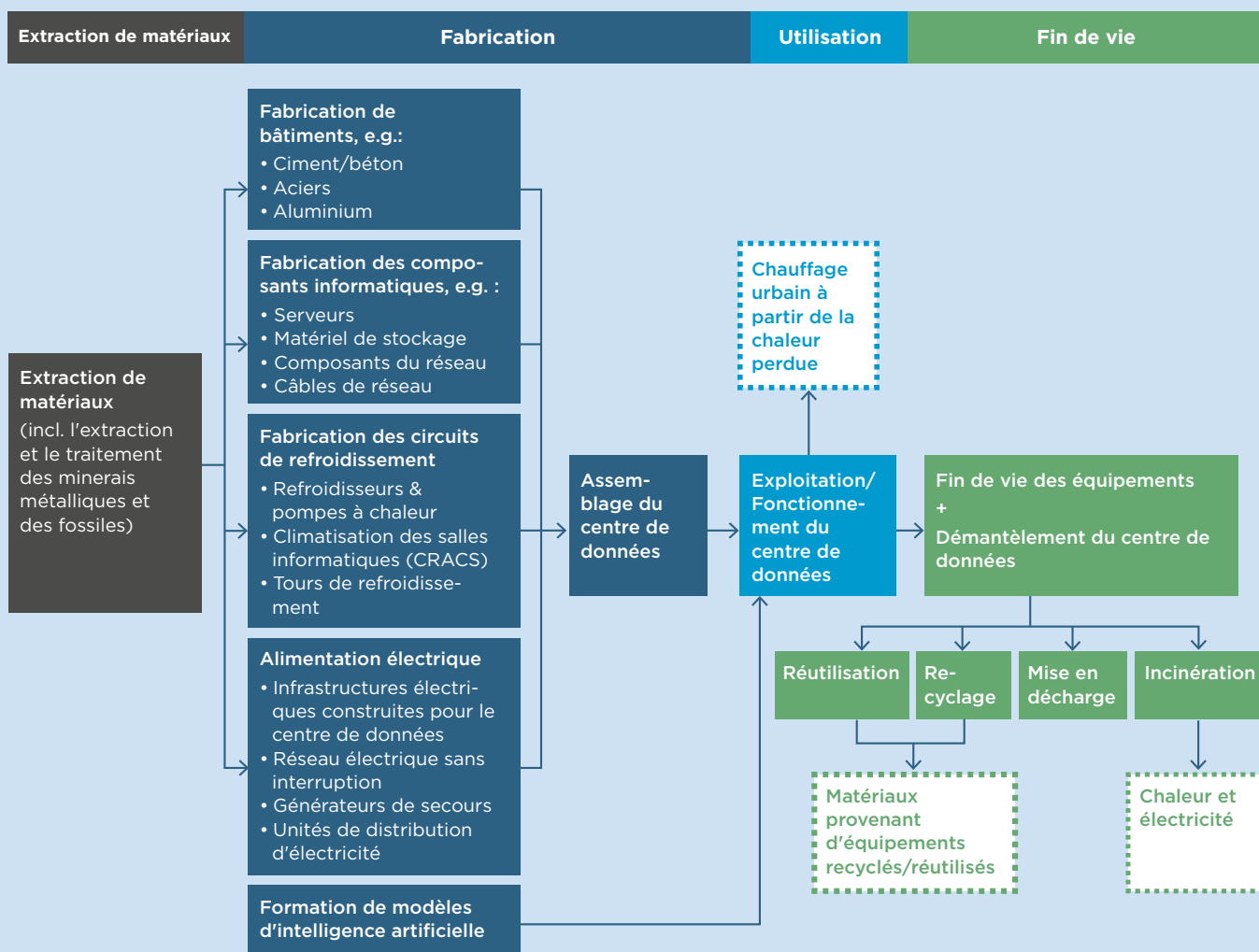
2. DES EFFORTS EXISTANTS POUR AMÉLIORER LA DURABILITÉ DES CENTRES DE DONNÉES CENTRÉS SUR LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE PENDANT LES OPÉRATIONS

Un accent mis sur la consommation d'électricité. La demande continue (24 heures sur 24, 7 jours sur 7) et élevée en électricité des équipements des centres de données, et les ramifications des contributions au changement climatique qui en résultent, ont orienté les actions vers la réduction de la consommation d'énergie pendant les opérations. Des efforts se sont ainsi concentrés sur l'amélioration de l'efficacité énergétique, en particulier pour répondre à la forte demande énergétique des trois composants importants des centres de données : l'équipement informatique, le système de refroidissement et le système d'alimentation électrique^{ii, iii}.

Parmi les exemples de ces efforts, on peut citer 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 à l'aide de matériaux isolants et le recours à l'intelligence artificielle pour réguler le système de refroidissement du centre de données. Au-delà de l'efficacité énergétique, les géants des TIC, tels que Google, Microsoft et Facebook, ont également commencé à recourir de plus en plus aux énergies renouvelables pour alimenter leurs centres de données.

Les mesures d'évaluation et de suivi utilisées. Un certain nombre de mesures ont été mises au point pour évaluer

Figure 1. Illustration simplifiée du cycle de vie d'un centre de données.



Les cases en pointillé indiquent la récupération des matériaux et de l'énergie. Ceux-ci remplacent des matériaux et énergie de même propriété fonctionnelles obtenus à partir de moyens conventionnels; par exemple, la chaleur résiduelle produite par les activités des centres de données peut être captée et distribuée aux clients voisins, tels que les maisons, les bureaux, les piscines ou les serres,

et éviter ainsi la production et la distribution de chaleur provenant d'autres sources comme la combustion du gaz naturel. Notez que les activités connexes qui ont lieu tout au long du cycle de vie, comme le transport et l'approvisionnement en énergie nécessaires, ne sont pas indiqués sur la figure, bien qu'elles fassent partie intégrante du cycle de vie du système.

quantitativement et suivre les performances des centres de données en matière de durabilité. La plupart d'entre elles se sont concentrées sur l'efficacité énergétique et l'utilisation d'énergies renouvelables au sein du système informatique ainsi que dans l'apport en électricité et refroidissement du système. Une mesure largement utilisée est l'efficacité d'utilisation de puissance (ou « Power Usage Effectiveness », PUE), qui mesure le rapport entre la puissance utilisée par l'équipement informatique et la puissance fournie au centre de données. Plus récemment, le secteur des TIC a commencé à s'intéresser à d'autres mesures d'efficacité au-delà du seul problème énergétique et à utiliser l'efficacité d'utilisation carbone (CUE) et l'efficacité d'utilisation de l'eau (WUE) pour mesurer les performances en matière d'émissions de gaz à effets de serre (GES) et d'utilisation de l'eau pendant les opérations du centre de données, respectivement.

Insuffisances des actions passées et présentes, et voie à suivre. Les mesures et indicateurs susmentionnés sont tous liés aux opérations des centres de données et adoptent une perspective centrée sur quelques enjeux uniques, principalement liés aux besoins énergétiques et, dans une moindre mesure, aux émissions de GES et à la consommation d'eau. La durabilité environnementale va toutefois au-delà de ces problématiques, car elle nécessite de prendre en compte les dommages causés aux écosystèmes, à la santé humaine et aux ressources naturelles dans leur ensemble via un large éventail d'impacts environnementaux, comme la toxicité issue des rejets de produits chimiques dans l'environnement. Les actions passées et présentes négligent ainsi des aspects potentiellement importants pour la durabilité des centres de données, tels que les problèmes environnementaux engendrés en dehors des opérations des centres de données, notam-



ment ceux qui découlent de la construction, du transport et de la fin de vie de leurs différents composants.

Pour les englober et permettre une évaluation complète de la durabilité environnementale, une perspective de cycle de vie et multicritère (= qui inclut un grand nombre d'impacts pertinents) est ainsi nécessaire.

Une telle perspective peut être fournie par la méthodologie d'analyse du cycle de vie (ACV) qui est normalisée par l'ISO et permet de quantifier une grande variété d'impacts^a environnementaux associés aux produits, technologies ou systèmes pris dans leur cycle de vie. Le cycle de vie d'un centre de données comprend toutes les activités et tous les processus, depuis l'extraction des matières premières, en passant par la fabrication de ses composants et sa construction ainsi que son fonctionnement tout au long de sa durée de vie, jusqu'à son démantèlement et sa fin de vie impliquant l'élimination et la récupération éventuelles de matériaux et d'énergie. La figure 1 illustre le cycle de vie simplifié d'un centre de données typique.

Ces dernières années, les exigences de la norme ISO 14044 encadrant la conduite des ACV ont servi de base à l'élaboration de deux documents d'orientation ciblant les applications aux biens et services dans le secteur des TIC : le « Data Centre Life Cycle Assessment Guidelines » développé par The Green Grid^{vi}, et le document d'orientation du European Telecommunications Standards Institute (ETSI)^{vii}. La Commission européenne a signalé l'utilisation

de l'ACV comme optionnelle et avec une priorité moyenne dans son Code de conduite des Data Centres sur l'efficacité énergétique, qui vise à fournir des orientations pour améliorer l'efficacité énergétique des centres de données. La section suivante vise à démontrer que ce marquage devrait être renforcé et que des évaluations plus complètes de la durabilité environnementale sont nécessaires.

3. L'ANALYSE DU CYCLE DE VIE POUR ASSURER UNE PERSPECTIVE SYSTÉMIQUE ET MULTI-IMPACT

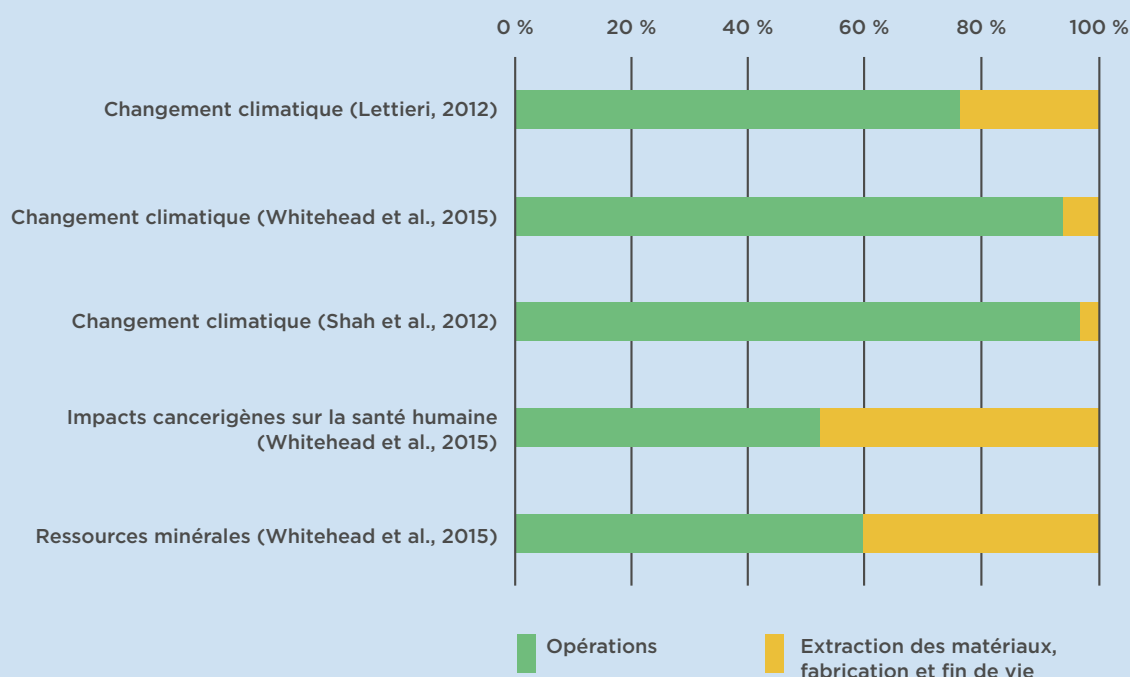
Importance de la perspective du cycle de vie. L'inclusion de l'ensemble du cycle de vie des centres de données est essentielle pour éviter d'éventuels reports d'impacts environnementaux d'un endroit du cycle de vie du système à une autre ou d'un composant à un autre.

Un exemple est le passage des combustibles fossiles aux sources d'énergie renouvelables comme le photovoltaïque ou les éoliennes, où la réduction des impacts environnementaux pendant le fonctionnement du système (pas de combustion pendant la production d'électricité) ne signifie pas que c'est le cas sur l'ensemble du cycle de vie, puisque la production et la fabrication des panneaux photovoltaïques et des éoliennes peuvent être sources à des impacts potentiellement importants, comme la pollution chimique ou l'appauvrissement en ressources métalliques^{viii}.

Seules quelques études d'ACV ont été menées sur les centres de données, mais leurs résultats démontrent la pertinence d'adopter une approche de cycle de vie cou-

^a Par exemple, le changement climatique, l'épuisement des ressources, l'écotoxicité, l'eutrophisation, la consommation d'eau, l'utilisation des sols, la toxicité pour l'homme, l'appauvrissement de la couche d'ozone, les rayonnements ionisants, etc.

Figure 2. Contributions du cycle de vie à certains impacts environnementaux associés aux centres de données.



Notes : Lettieri (2012)^{ix} a évalué un centre de données fictif d'une puissance informatique moyenne de 1,3 MW situé en Californie du Nord. Whitehead et al. (2015)^x ont étudié un centre de données existant situé au Royaume-Uni avec une puissance informatique

moyenne de 13 MW. Le centre de données analysé par Shah et al. (2012)^{xi} était un centre de données opérationnel d'une compagnie d'assurance avec une puissance informatique moyenne de 1,8 MW.

vrant de multiples impacts environnementaux. Dans ces études, les opérations du centre de données entraînent un certain nombre d'impacts environnementaux, comme le changement climatique (voir figure 2), en raison de la forte demande en électricité et en refroidissement des systèmes informatiques qui est principalement assurée aujourd'hui par la combustion de combustibles fossiles. Toutefois, pour certains problèmes environnementaux, les impacts découlant des étapes précédant et suivant l'exploitation ou le fonctionnement du centre de données sont aussi importants que les impacts découlant des opérations (voir figure 2). Par exemple, les équipements des centres de données nécessitent l'extraction de matériaux, la fabrication et l'élimination d'une grande quantité de métaux. Ces processus peuvent entraîner des problèmes de disponibilité des ressources et une pollution potentielle par les métaux, qui peuvent à leur tour causer des dommages importants en termes de toxicité pour les écosystèmes et la santé humaine. Des décisions telles que l'augmentation de la fréquence de remplacement des serveurs pour accroître l'efficacité énergétique pendant le fonctionnement des centres de données entraînent donc des exigences plus élevées en matière de consommation de matériaux et d'efforts de fabrication, et donc un transfert des impacts environnementaux de la phase d'exploitation/fonctionnement vers les autres phases du cycle de vie.

En général, la contribution de la phase d'exploitation aux impacts environnementaux doit être considérée avec prudence

car un certain nombre de paramètres spécifiques au site peuvent l'influencer. Comme le laisse entendre l'une des études^{ix}, le mix énergétique du réseau électrique peut avoir une forte influence sur les impacts environnementaux du cycle de vie des centres de données. Dans la figure 2, les trois études existantes ont été menées dans des pays où les mix électriques comprenaient une grande proportion de combustibles fossiles. Toutefois, on peut s'attendre à des répartitions des impacts environnementaux très différentes entre la phase d'exploitation et les autres phases du cycle de vie des centres de données lorsque ceux-ci sont situés dans des pays dont le réseau électrique est composé à près de 100 % d'énergies renouvelables, comme la Norvège ou l'Islande, par exemple.

Dans leurs efforts pour réduire efficacement la contribution des centres de données aux impacts environnementaux tels que le changement climatique, les parties prenantes doivent donc examiner attentivement le type de sources d'énergie fournissant la demande d'électricité et les sites choisis pour construire les centres de données, en plus de prendre en compte les gains d'efficacité énergétique.

Importance d'une perspective à impacts multiples. Même dans un contexte où la demande d'électricité pour le fonctionnement des centres de données serait assurée par des sources d'énergie renouvelables, un certain nombre d'autres impacts environnementaux resteraient à



prendre en compte, d'où la nécessité de couvrir tous les problèmes potentiels lors de l'évaluation de la durabilité environnementale des centres de données. Comme le montre la figure 2, les impacts toxicologiques liés aux substances cancérigènes durant la production d'équipements informatiques (incluant également l'extraction des matériaux nécessaires), sont un exemple de ces problèmes additionnels à considérer. Comme mentionné précédemment, l'utilisation des ressources minérales et métalliques est un autre aspect important à évaluer. En outre, pendant le fonctionnement des centres de données, des quantités importantes d'eau sont nécessaires pour le refroidissement des serveurs. L'utilisation de l'eau peut entraîner des problèmes de disponibilité à l'échelle locale (par exemple : pénuries pour les écosystèmes, la consommation humaine et d'autres secteurs concurrents comme l'agriculture), ainsi que des dommages potentiels aux écosystèmes par la pollution thermique car l'eau est rejetée dans les rivières à une température plus élevée. Les différents équipements des centres de données contiennent également de nombreux composants métalliques qui nécessitent une quantité importante de métaux pendant la phase de production. L'augmentation exponentielle de la capacité des centres de données mondiaux peut ainsi entraîner une demande croissante de métaux et de matériaux non métalliques spécifiques, notamment des terres rares, qui sont également des matériaux clés dans d'autres secteurs (par exemple, le secteur de l'éolien), qui peut à son tour entraîner des problèmes de disponibilité. Les efforts déployés pour remédier à cette pénurie de matériaux peuvent consister à améliorer l'efficacité d'utilisation des maté-

riaux lors de la fabrication des équipements (réduction des déchets) ou à renforcer la réutilisation et le recyclage des matériaux en fin de vie des équipements. Pour tester et identifier ces mesures et d'autres mesures d'atténuation possibles (par exemple, l'intégration d'initiatives d'économie circulaire, des mesures d'écoconception, des incitations à l'approvisionnement en énergie renouvelable, etc.) et leurs impacts de grande portée, il convient d'utiliser l'ACV, qui permet d'aider les responsables politiques et les décideurs à concevoir des stratégies à long terme pour s'assurer de la durabilité des centres de données futures.

4. DISCUSSIONS ET RECOMMANDATIONS

Besoins en matière de données. La réalisation d'une ACV peut nécessiter beaucoup de temps et de ressources. Pour faciliter ces évaluations, les bases de données d'ACV contiennent des milliers de processus qui peuvent constituer un point de départ utile, et permettent aux utilisateurs de concentrer la collecte de données sur les processus clés et d'améliorer de manière itérative la précision des résultats. Bien que les bases de données accessibles au public ne semblent pas encore fournir un niveau de détail suffisant pour modéliser le cycle de vie d'un centre de données, des bases de données telles que GaBi^{xii} ou Ecoinvent^{xiii} qui contiennent plusieurs dizaines ou centaines de processus pertinents pour l'industrie des TIC peuvent être utilisées. Pour suivre la croissance rapide des centres de données et les préoccupations croissantes concernant leurs impacts environnementaux, il est attendu à ce que la disponibilité

des processus pertinents s'accroissent dans les bases de données d'ACV dans un futur proche.

Considérations pour les pays en développement. Si la plupart des centres de données sont situés en Amérique du Nord et en Europe, leur présence dans les pays en développement augmente également, bien qu'à une échelle beaucoup plus réduite. Les problèmes ralentissant leur déploiement dans ces pays sont souvent dus au manque de compétences pour les mettre en place et les exploiter, ainsi qu'à l'absence d'infrastructures appropriées, notamment en matière d'approvisionnement en énergie et en eau. Le manque d'infrastructures fiables peut non seulement entraver le déploiement des centres de données, mais il peut également aller à l'encontre de leur durabilité, lorsqu'il est mal opéré. Cela pourrait être le cas, par exemple, dans les pays dont le réseau national est fortement tributaire des combustibles fossiles, qui connaissent des problèmes de stress hydrique élevé et/ou dont les systèmes de gestion des déchets électroniques ne sont pas opérants. Par ailleurs, dans les cas où des infrastructures spécifiques (par exemple, l'installation d'une nouvelle structure électrique) sont construites dans le seul but de créer des centres de données, le risque est de détourner les décideurs politiques ou industrielles de mesures qui seraient nécessaires et prévalentes pour satisfaire des besoins fondamentaux à l'échelle locale (par exemple, résoudre un manque d'accès à l'électricité). Néanmoins, il ne faut pas négliger le rôle de catalyseurs positifs que les centres de données peuvent avoir dans certains cas en facilitant l'amélioration d'infrastructures pour qu'elles bénéficient au développement durable des communautés locales. Cela démontre également l'importance d'adopter une approche holistique de la durabilité sociale, environnementale et économique et de veiller à ce que les meilleures pratiques appliquées dans les pays développés soient transférées et intégrées dans les pays en développement pour permettre aux centres de données de devenir durables, quel que soit leur lieu d'installation.

Aller au-delà de l'éco-efficacité. L'histoire a montré que les gains d'efficacité technologique sont généralement associés à une augmentation de la demande ou de l'utilisation de cette technologie en raison des effets rebond, ce qui se traduit globalement par une diminution globale de l'efficacité. Les centres de données semblent être sur cette voie, et les gains prévus en matière d'éco-efficacité ne pourront probablement pas à eux seuls contrecarrer l'utilisation accrue des centres de données, caractérisée par leur augmentation prévue de la consommation d'électricité par un facteur de 3 à 8 entre 2019 et 2030 (en supposant les meilleurs et pires scénarios dans les projections énergétiques actuelles)^{xiv}. Lorsque des systèmes technologiques en plein essor, tels que les centres de données, sont évalués, il faut donc tenir compte de ces deux perspectives, à la fois d'éco-efficacité et d'éco-efficience^{xv}. L'ACV



est une méthodologie largement utilisée pour évaluer la première dans sa capacité à différencier, parmi plusieurs alternatives de produits ou de systèmes, celle(s) qui est/sont associée(s) aux impacts environnementaux les plus faibles. Elle n'aborde pas encore la seconde.

Pour aborder l'éco-efficience, nous devons adopter une perspective large afin de saisir les interactions dynamiques entre les centres de données, ou par extension l'ensemble du secteur des TIC, et d'autres systèmes, y compris les effets rebond potentiels. Par exemple, il faut tenir compte de l'ajout ou du déplacement éventuel de la capacité des installations électriques en raison de l'utilisation croissante des TIC (et de la demande d'énergie). Dans le même temps, nous devons en outre établir un lien entre les impacts environnementaux mondiaux des centres de données et les limites planétaires ou limites de durabilité, qui représentent le niveau maximal d'impacts environnementaux que nous pouvons nous permettre sans dépasser les capacités en ressources finies de la Terre ou compromettre la durabilité des ressources naturelles et systèmes écosystémiques actuels. Un certain nombre d'approches scientifiques ont défini de tels seuils, notamment le cadre du concept de limites planétaires^{xvi}, le cadre de l'empreinte écologique^{xvii}, ou la définition d'objectifs de durabilité comme celui visant à maintenir la température moyenne mondiale en dessous de 1,5°C au-dessus des niveaux préindustriels (formalisé par l'accord de Paris). Il reste encore de nombreux défis à relever pour estimer ces limites planétaires et les décliner au niveau des centres de données, où elles pourraient alors servir de référence lors de l'évaluation de l'empreinte écologique mondiale des centres de données. Une fois déterminées, leur utilisation permettraient alors de véritablement définir un centre de données écologiquement durable dans l'absolu et d'identifier le chemin à prendre pour rendre opérationnelle cette définition.

REMERCIEMENTS

AUTEURS

Alexis Laurent

Groupe de Recherche pour l'évaluation quantitative de la soutenabilité, Département de Technologie, Gestion et Économie, Université Technique du Danemark (DTU)

Mirko Dal Maso

Partenariat DTU - PNUE (UNEP DTU Partnership), Département de Technologie, Gestion et Économie, Université Technique du Danemark (DTU)

A également contribué à cette publication:

Xiao Wang, Xianli Zhu et Gabriela Prata Dias.

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.

BIBLIOGRAPHIE

- Jones, N. (2018). How to stop data centres from gobbling up the world's electricity. *Nature*, 561(7722), 163–166. <https://doi.org/10.1038/d41586-018-06610-y>
- Arlitt, M., Bash, C., Blagodurov, S., Chen, Y., Christian, T., Gmach, D., Zhou, R. (2012). Towards the design and operation of net-zero energy data centers. *InterSociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems, ITherm*, 552–561. <https://doi.org/10.1109/ITHERM.2012.6231479>
- Flucker, S., Whitehead, B., & Tozer, R. (2017). Minimising Data Centre Environmental Impact – Beyond Energy Efficiency. *Proceedings of CIBSE Technical Symposium 2017*, (April), 1–11. <https://dc-oi.com/publications/>
- Shah, A., Bash, C., Sharma, R., Christian, T., Watson, B. J., & Patel, C. (2011). Evaluating life-cycle environmental impact of data centers. *Journal of Electronic Packaging, Transactions of the ASME*, 133(3), 1–9. <https://doi.org/10.1115/1.4004096>
- Whitehead, B., Andrews, D., Shah, A., & Maidment, G. (2014). Assessing the environmental impact of data centres part 1: Background, energy use and metrics. *Building and Environment*, 82, 151–159. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.08.021>
- The Green Grid. (2012). Data Centre Life Cycle Assessment Guidelines. <https://www.thegreengrid.org/en/resources/library-and-tools/236-Data-Center-Life-Cycle-Assessment-Guidelines>
- ETSI. (2015). Environmental Engineering (EE); Methodology for environmental Life Cycle Assessment (LCA) of Information and Communication Technology (ICT) goods, networks and services, 1, 1–167. https://www.etsi.org/deliver/etsi_es/203100_203199/203199/01.03.01_60/es_203199v010301p.pdf
- Laurent A., Olsen S.L., Hauschild M.Z., 2012. Limitations of carbon footprint as indicator of environmental sustainability. *Environmental Science and Technology* 46, 4100–4108
- Lettieri, D. J. (2012). Expeditious Data Center Sustainability, Flow, and Temperature Modeling: Life-Cycle Exergy Consumption Combined with a Potential Flow Based, Rankine Vortex Superposed, Predictive Method. <https://escholarship.org/uc/item/9p-f8k8wk>
- Whitehead, B., Andrews, D., & Shah, A. (2015). The life cycle assessment of a UK data centre. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 20(3), 332–349. <https://doi.org/10.1007/s11367-014-0838-7>
- Shah, A., Chen, Y., & Bash, C. E. (2012). Sources of variability in data center lifecycle assessment. *IEEE International Symposium on Sustainable Systems and Technology*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ISSST.2012.6227975>
- GaBi database, <http://www.gabi-software.com/support/gabi/gabi-database-2016-lci-documentation/extension-data-base-xi-electronics/>
- Ecoinvent database, <https://www.ecoinvent.org/database/data-base.html>
- Andrae, A., & Edler, T. (2015). On Global Electricity Usage of Communication Technology: Trends to 2030. *Challenges*, 6(1), 117–157. <https://doi.org/10.3390/challe6010117>
- Hauschild MZ (2015) Better – but is it good enough? On the need to consider both eco-efficiency and eco-effectiveness to gauge industrial sustainability. *Procedia CIRP* 29, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.02.126>
- Steffen, W., Richardson, K., Rockstrom, J.,... Sorlin, S. (2015). Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science*, 347(6223), 1259855–1259855. <https://doi.org/10.1126/science.1259855>
- Global Footprint Network. <https://www.footprintnetwork.org/>