



HAL
open science

De l'eau dans les nuages

Sylvain Bouveret, Aurélie Bugeau, Anne-Cécile Orgerie, Sophie Quinton

► **To cite this version:**

Sylvain Bouveret, Aurélie Bugeau, Anne-Cécile Orgerie, Sophie Quinton. De l'eau dans les nuages. Annales des Mines - Enjeux Numériques, 2024, 27, pp.40-47. hal-04698568

HAL Id: hal-04698568

<https://hal.science/hal-04698568>

Submitted on 16 Sep 2024

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.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

De l'eau dans les nuages

Par Sylvain BOUVERET

Laboratoire d'Informatique de Grenoble et Grenoble INP - Université Grenoble-Alpes

Aurélie BUGEAU

Université de Bordeaux, CNRS, Bordeaux INP, LaBRI, UMR 5800

Anne-Cécile ORGERIE

Univ. Rennes, Inria, CNRS, IRISA

Et Sophie QUINTON

Centre de recherche Inria de l'Université Grenoble Alpes

Dans cet article, nous abordons la question des impacts environnementaux des infrastructures numériques sous le prisme particulier des enjeux liés à l'eau dans les centres de données (DCs) qui constituent les *clouds*. Nous tâchons de dresser un panorama de l'utilisation de l'eau dans les DCs, que cette utilisation soit directe, pour le refroidissement et l'humidification des équipements électroniques, ou indirecte pour la production électrique, la production et la fin de vie des équipements.

Ce panorama est illustré d'éléments chiffrés essentiellement issus des fournisseurs de services *cloud* eux-mêmes, afin de donner quelques ordres de grandeur sur la consommation d'eau et les tendances. L'objectif est également de discuter de ces chiffres, de la pertinence des indicateurs habituels et des transferts d'impacts potentiels associés, et de rappeler les forts enjeux spatio-temporels et de conflits d'usage liés à la ressource en eau.

INTRODUCTION

L'augmentation des niveaux de stress hydrique dans de nombreux pays représente un enjeu géopolitique majeur et un sujet de préoccupation croissante (Unesco, 2024). C'est dans ce contexte qu'émergent un certain nombre de controverses, voire de conflits, autour de l'utilisation d'eau par le secteur du numérique.

Le présent article se focalise sur les impacts sur la ressource en eau des centres de données (*data centers*, ou DCs) des infrastructures de *cloud* et présente un panorama des connaissances sur le sujet, en reprenant la structuration en *scopes* utilisée dans les bilans carbone. Ainsi, nous détaillerons d'abord l'utilisation d'eau directement dans les centres de données afin d'assurer leur bon fonctionnement (refroidissement et humidification), ce qui correspond au *scope 1*. Nous évoquerons ensuite l'eau indirectement nécessaire aux DCs pour la production de l'électricité consommée par ces DCs (*scope 2*). Enfin, nous décrivons les impacts sur la ressource en eau de la production et la fin de vie des équipements informatiques, qui relèvent du *scope 3*. Nous concluons par une discussion sur les chiffres avancés, leur pertinence et leur utilité.

LES ENJEUX LIES A L'EAU

Commençons par préciser quelques notions en nous appuyant sur (Maesele *et al.*, 2021). L'eau prélevée correspond à l'eau qui est extraite du milieu naturel. Une partie de cette eau est rejetée (c'est-à-dire restituée au milieu naturel) après utilisation et éventuellement traitement. L'eau consommée correspond à la différence entre l'eau prélevée et l'eau rejetée. Il s'agit d'eau évaporée, absorbée par les plantes ou le sol, intégrée dans les produits, ou transférée vers un autre bassin versant.

Les impacts sur la ressource en eau concernent d'une part la quantité d'eau consommée au regard de l'eau disponible, en prenant en compte les conditions géographiques et de saisonnalité, d'autre part les pollutions. Ajoutons que le lien entre pollution de l'eau et réduction de la disponibilité en eau ne fait pas consensus et est rarement pris en compte dans les analyses d'impact.

Depuis 2016, la norme empreinte eau ISO 14046, basée sur une approche de type cycle de vie, fournit un cadre pour rendre compte de ces impacts. Après avoir été inventoriés, tous les flux d'eau consommée et, si une approche multicritère est appliquée, de polluants émis, sont convertis en impacts potentiels. Si l'empreinte eau est monocritère, seuls les impacts dus à la privation d'eau sont évalués en utilisant des indicateurs locaux de stress hydrique.

UTILISATION DIRECTE (SCOPE 1)

Pourquoi a-t-on besoin d'eau dans un centre de données ?

L'eau utilisée dans un DC sert principalement au refroidissement et à l'humidification des équipements informatiques du centre de données. En effet, les équipements informatiques consomment de l'électricité, qu'ils dissipent sous forme de chaleur. Or, une chaleur excessive peut entraver le fonctionnement et les performances des composants. L'ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) recommande ainsi de maintenir une température à l'intérieur du centre de données comprise entre 18 et 27°C (ASHRAE TC 9.9¹). De plus, afin d'éviter les décharges électrostatiques qui peuvent survenir dans un environnement trop sec et endommager les serveurs, l'ASHRAE fournit également des recommandations concernant les plages de taux d'humidité acceptables.

Les quantités d'eau utilisées varient fortement d'un centre de données à l'autre (voir la Figure 1), en fonction du système de refroidissement utilisé, de la localisation ou de la taille du centre de données.

Comment refroidir un centre de données ?

De nombreuses méthodes de refroidissement des DCs existent, mais le principe général reste le même (Li *et al.*, 2023) : la chaleur générée par les équipements est évacuée vers le milieu extérieur par l'intermédiaire d'un fluide, *via* l'utilisation de tours aéroréfrigérantes ou en utilisant directement l'air extérieur.

Dans les DCs refroidis par tours aéroréfrigérantes, l'eau circule en général dans deux circuits séparés, l'un fermé et l'autre ouvert. Un échangeur transfère la chaleur de l'air du DC à l'eau du circuit fermé. Cette eau chaude est ensuite envoyée au refroidisseur, qui en absorbe les calories, en général en utilisant de l'eau en circuit ouvert. Cette eau est à son tour refroidie dans des tours aéroréfrigérantes, essentiellement par évaporation.

¹ <https://www.ashrae.org/technical-resources/bookstore/datacom-series>

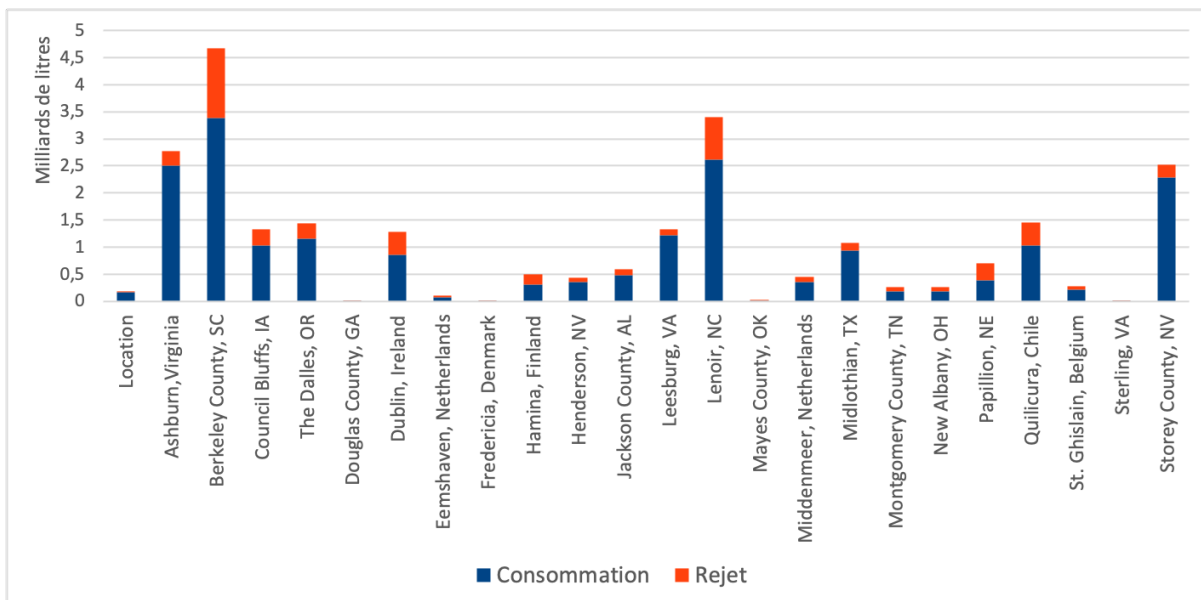


Figure 1 : Rejets et consommations d'eau dans les centres de données de Google, 2023 en milliards de litres (Source : Google, 2023).

Dans ce système, l'eau du circuit fermé n'est pas évaporée, absorbée ou rejetée. En revanche, une partie de l'eau du système ouvert est consommée par évaporation directe. De plus, l'eau non évaporée ne peut être réutilisée qu'un nombre limité de fois (entre 3 et 10), car sa qualité se dégrade considérablement au fil des cycles. Elle est alors rejetée et de la nouvelle eau est prélevée.

Dans les DCs refroidis directement par air extérieur, le principe est encore plus simple. Lorsque les conditions le permettent, l'air extérieur est soufflé directement sur les équipements afin de les refroidir. Si l'air est trop sec et trop chaud en revanche, il peut être nécessaire d'utiliser de l'eau. Dans certaines conditions, une grande quantité d'eau peut alors être consommée par évaporation (70 % de l'eau injectée, selon le rapport de Meta, 2023).

D'autres systèmes existent pour le refroidissement des DCs, comme par exemple le refroidissement géothermique, utilisant la température constante du sous-sol ou d'une nappe phréatique pour évacuer la chaleur. La consommation d'eau de ces systèmes est quasi-nulle, mais ces méthodes de refroidissement sont peu répandues.

En résumé, l'eau des systèmes de refroidissement peut être impactée de deux manières : perdue par évaporation (dans les tours aéroréfrigérantes par exemple) ou dégradée dans son état minéral et bactériologique (ce qui nécessite un traitement). Par ailleurs, une grande partie de l'eau prélevée dans ces systèmes provient du réseau d'eau potable, même si certains opérateurs (comme Google par exemple) utilisent aussi de l'eau issue de réseaux d'assainissement (Zhang, 2024) (voir la Figure 2).

Notons enfin que l'efficacité des systèmes de refroidissement et leur consommation d'eau est très dépendante de facteurs spatiaux et temporels. Ainsi, ces systèmes fonctionnent mieux dans des environnements où la température est moins élevée, et l'air moins sec, ce qui peut entrer en conflit direct avec des exigences de décarbonation électrique, qui typiquement exigent des lieux et des heures où l'énergie solaire est abondante (Li, 2023).

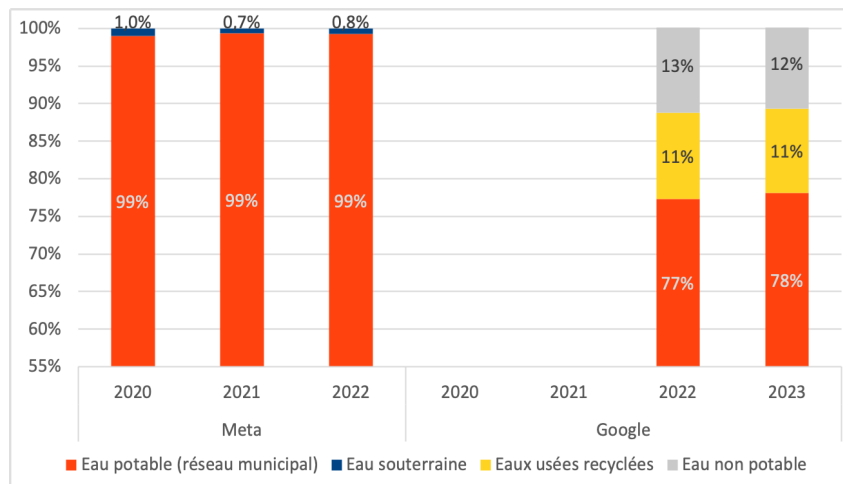


Figure 2 : Source de prélèvements d'eau (Source : Meta, 2023 ; Google, 2023 ; Google, 2024).

Quels sont les chiffres de consommation ?

Il est possible de connaître les quantités d'eau prélevées et consommées par certaines entreprises du numérique grâce à leurs rapports environnementaux annuels. On observe ainsi que les DCs représentent la plus grande part des consommations (et prélèvements) des géants du numérique (voir la Figure 3). Il sera par ailleurs intéressant de questionner la part de l'IA dans la croissance de l'utilisation de l'eau. En effet, des premières études (Li, 2023) estiment que l'entraînement de GPT-3 dans les centres de données de Microsoft peut consommer un total de 700 000 litres pour le scope 1, ce qui semble relativement faible au regard des milliards de litres d'eau consommée par les entreprises (voir la Figure 3). Par ailleurs, GPT-3 pourrait consommer 500 ml pour 10 à 50 requêtes une fois déployé, ce qui peut paraître faible, mais interroge au vu de l'utilisation croissante des IA génératives au quotidien.

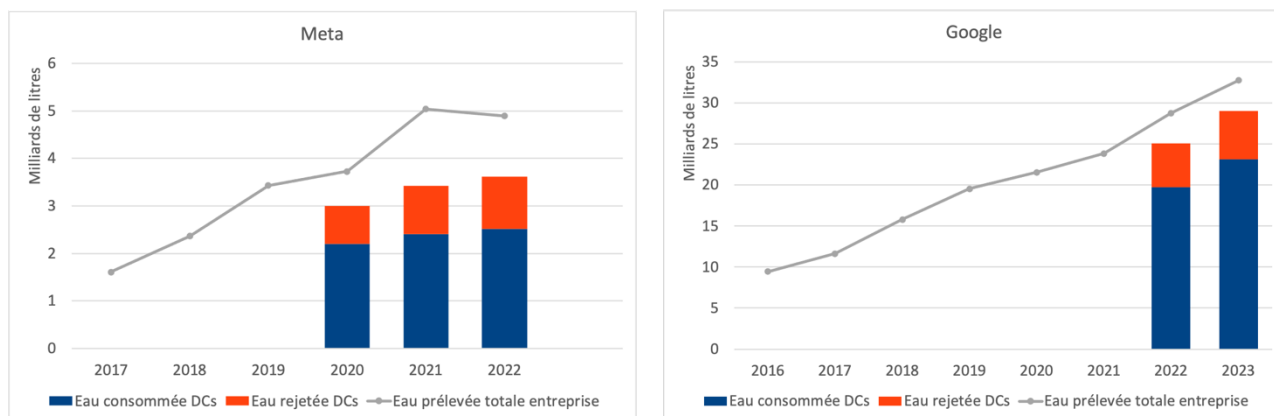


Figure 3 : Consommations et rejets d'eau en milliards de litres dans les DCs en comparaison avec les prélèvements totaux d'eau des entreprises (Source : Meta, 2023 ; Google, 2023 ; Google, 2024).

En France, un rapport ARCEP indique que le volume d'eau prélevé par les entreprises dont l'activité principale est l'exploitation de centres de données (représentant 19 opérateurs pour plus de 100 centres de données) est de 482 millions de litres d'eau en 2022 (ARCEP, 2024). C'est l'équivalent de la consommation d'eau domestique d'environ 9 000 Français.

À notre connaissance, les gestionnaires de DCs ne publient pas le résultat d'une empreinte eau exhaustive. Certaines entreprises (exemple : Meta depuis 2021) précisent si l'eau consommée

provient de régions en fort stress hydrique (17 % pour Meta en 2022) ou non, et son lieu de rejet (uniquement dans le réseau d'égouts).

Un autre indicateur de performance (KPI) pour l'eau est recommandé pour les DCs : le WUE (*Water Usage Effectiveness*), spécifié dans la norme ISO/IEC 30134-9:2022 et introduit par le groupement d'entreprises Green Grid (Azevedo *et al.*, 2011). Le WUE est le ratio entre l'eau consommée par le DC et la consommation électrique des équipements informatiques. Il est exprimé en litres/kWh. Les valeurs varient fortement suivant les conditions locales : par exemple entre 0 et 9 l/kWh dans l'étude de (Karimi *et al.*, 2022) pour deux DCs en colocation dans l'agglomération de Phoenix aux États-Unis, et entre 2,04 et 2,42 l/kWh sur une étude concernant 4 DCs utilisant un refroidissement avec circuit ouvert dans quatre régions du monde dans (Gnibga *et al.*, 2024).

Pour les concepteurs et exploitants de DCs, il y a un compromis à trouver entre consommation électrique et consommation d'eau, les systèmes de refroidissement les plus efficaces en énergie reposant sur une utilisation accrue de l'eau. Les leviers d'action possibles visent notamment à adapter dynamiquement ce compromis en fonction de l'utilisation et des conditions climatiques (variations saisonnières, stress hydrique), à revoir les marges de fonctionnement en termes de redondance des infrastructures numériques, à exploiter d'autres sources que l'eau potable et enfin à réduire les usages des DCs.

UTILISATION INDIRECTE (SCOPE 2)

Au-delà de la consommation d'eau directe sur le site du DC, de l'eau est nécessaire pour la production de son électricité, là aussi souvent pour le refroidissement. Un indicateur de performance dédié (WUE_{source}) est utilisé, en prenant en compte le facteur d'intensité eau de l'énergie. Cette intensité eau, exprimée en l/kWh, varie fortement en fonction de la source d'énergie et concerne principalement de l'eau consommée par évaporation. Par exemple en France, elle est de 1,55 l/kWh pour le biogaz, 2,42 l/kWh pour le nucléaire et nulle pour le photovoltaïque (Reig *et al.*, 2020). La moyenne de l'intensité eau sur la période 2016-2020 en France est de 0,87 l/kWh d'après EDF², et de 3,67 l/kWh d'après (Reig *et al.*, 2020). Le WUE_{source} représenterait ainsi en France 2,8 fois le WUE sur site (Gnibga *et al.*, 2024).

L'eau utilisée pour le refroidissement dans les scopes 1 (DC en lui-même) et 2 (production d'électricité) est prélevée à un endroit et un instant donné et ces prélèvements peuvent entraîner des conflits d'usage. En effet, l'eau est indispensable pour d'autres secteurs comme l'agriculture, le résidentiel, l'industrie, etc., en particulier en période de fortes chaleurs, souvent corrélées à des périodes de sécheresse. De plus, il est indiqué dans (Maesele *et al.*, 2022) que bien que l'eau consommée rejoigne le grand cycle de l'eau et donc n'entraîne pas de privation d'eau à l'échelle globale, "*dans les zones arides et semi arides cette privation d'eau est effective puisque les quantités d'eau concernées ne précipitent pas sur place mais dans des zones tempérées ou sur les océans.*"

LES AUTRES PHASES DU CYCLE DE VIE DES EQUIPEMENTS (SCOPE 3)

Le scope 3 concerne toutes les autres étapes du cycle de vie du centre de données, telles que la construction du bâtiment ou la fabrication et la fin de vie des équipements informatiques. Ces étapes sont largement méconnues et il n'existe à notre connaissance pas de données spécifiques aux DCs concernant leurs impacts sur la ressource en eau. Dans la suite, nous décrivons qualitativement

² <https://edf.publispeak.com/document-enregistrement-universel-2020/article/154/>

certains enjeux majeurs liés à l'eau qui concernent le cycle de vie des équipements informatiques en général, sans qu'il soit aujourd'hui possible de les remettre en perspective.

Extraction minière

L'eau représente un enjeu majeur pour l'industrie minière, qui produit les nombreux métaux nécessaires à la fabrication des équipements numériques en général. D'après le Columbia Center on Sustainable Investment, environ 70 % des exploitations minières des six plus grandes compagnies se situent dans des pays en situation de stress hydrique (Dedryver, 2020). Or l'extraction minière nécessite de grandes quantités d'eau pour les phases de broyage et de concentration du minerai. D'autre part, les déchets miniers contiennent souvent des substances dangereuses pour la santé et les écosystèmes telles que des métaux lourds (arsenic, cyanure, mercure, etc.), qui sont naturellement présentes dans la roche exploitée ou utilisées lors du traitement du minerai. Ces substances se retrouvent parfois dans l'eau des zones d'extraction minière, en particulier à cause du drainage minier acide. Elles peuvent également entraîner des pollutions de grande ampleur en cas de ruptures des digues de lacs de résidus miniers (Roche *et al.*, 2017).

Fabrication

La fabrication des équipements informatiques nécessite des grandes quantités d'eau. En particulier, la fabrication des semi-conducteurs utilise de l'eau ultra-pure pour le rinçage des disques de silicium (*wafers*) ainsi que de l'eau pour refroidir les systèmes de gravure et alimenter les laveurs de gaz. La consommation d'eau de l'un des principaux fabricants de semi-conducteurs dans le monde, TSMC, s'élevait à 150 000 m³ par jour en 2019, pour un prélèvement de 2 957 000 m³ par jour (TSMC, 2019). Cela a entraîné des problèmes majeurs pour Taïwan en 2021, année où la sécheresse exceptionnelle sur l'île a nécessité des arbitrages entre les usages (Roussilhe, 2021).

Fin de vie

Les déchets électroniques sont le flux de déchets solides qui connaît la croissance la plus rapide au monde (Baldé *et al.*, 2024). Moins d'un quart (22,3 %) de la masse de déchets électroniques est documentée comme étant correctement collectée et recyclée en 2022. Les fins de vie non régulées entraînent des risques potentiellement sévères sur la santé humaine liés à la contamination des sols, de l'air et de l'eau proches des sites de traitements ou de stockage des déchets (Ficher *et al.*, 2023) car les déchets électroniques contiennent des additifs toxiques ou des substances dangereuses.

DISCUSSION

Il paraît difficile de tirer des conclusions des chiffres incomplets et épars présentés dans cet article, suivant des indicateurs divers et souvent impossibles à remettre en perspective.

Ainsi, le WUE mis en avant par les fournisseurs d'infrastructures est un indicateur de performance relatif à la consommation énergétique, qui ne fournit pas d'information sur la consommation, les prélèvements ni les pollutions de l'eau causés par un DC. Les chiffres bruts eux-mêmes, tels que la consommation d'eau exprimée en m³ par an, ne disent rien sur les enjeux locaux tels que les lieux de prélèvement, le niveau de stress hydrique local, les conflits d'usage, etc. La prudence est donc de mise lorsqu'on observe que les quantités prélevées et consommées sont très variables d'un centre de données à l'autre, et même d'un mois à l'autre.

Parmi les améliorations envisageables pour l'analyse des impacts des DCs sur la ressource en eau, notons les propositions d'inclure la consommation d'eau verte et grise tout au long du cycle de vie et de la chaîne d'approvisionnement (Ristik *et al.*, 2015), de prendre en considération la disponibilité d'eau au niveau régional (ou national) ou une empreinte eau exhaustive. Rappelons ici que pour qu'une évaluation environnementale ait un effet positif, les informations et les connaissances qu'elle génère doivent permettre de déboucher sur des actions (Ekvall, 2019). Ainsi, l'objectif, le public cible, les scénarios de transition et le contexte dans lequel elle s'inscrit doivent être explicités et questionnés (Ekchajzer *et al.*, 2024).

Malgré la difficulté à interpréter les chiffres disponibles, les tendances de forte croissance du numérique au niveau mondial, dans un contexte d'augmentation des niveaux de stress hydrique dans de nombreuses régions du monde, posent indéniablement problème. Cela se reflète dans l'émergence de multiples conflits locaux autour de l'installation des centres de données comme par exemple en Uruguay (Livingstone, 2023) ou en Espagne (*Courrier International*, 2023). Citons également le cas du DC Microsoft implanté sur la municipalité de Hollands-Kroon aux Pays-Bas, dont la consommation initialement estimée à 12 à 20 millions de litres d'eau par an s'était élevée dans les faits à 84 millions de litres d'eau en 2021 (DCD, 2022). Microsoft a indiqué qu'une partie importante de cette consommation était imputable à la fabrication du DC. Cependant, les oppositions locales, notamment des agriculteurs, ont conduit la province du Noordholland à contester le permis de construire octroyé par la mairie et, finalement, le gouvernement hollandais à imposer un moratoire de 9 mois sur la construction de nouveaux DCs. Il serait ainsi sans doute pertinent de mieux décrire et caractériser les enjeux locaux liés à l'eau, et leur interaction avec d'autres enjeux locaux et globaux comme l'énergie, en s'appuyant entre autres sur des travaux en sociologie (Marquet, 2019).

Cet article a présenté un panorama des différents impacts des DCs sur la ressource en eau, ainsi que les enjeux et les difficultés de la quantification de ces impacts. L'utilisation croissante des DCs soulève des craintes quant à leur lien avec des difficultés d'accès à cette ressource. Notons pour conclure que ces questions dépassent le cadre des DCs et s'appliquent au numérique en général, comme illustré par les tensions liées à la production et à la fin de vie des équipements numériques dans leur ensemble.

REFERENCES

- ARCEP (2024), « Enquête annuelle "Pour un numérique soutenable" », <https://www.arcep.fr/cartes-et-donnees/nos-publications-chiffrees/impact-environnemental/enquete-annuelle-pour-un-numerique-soutenable-edition-2024.html>.
- AZEVEDO D., BELADY S. C. & POUCHET J. (2011), "Water usage effectiveness (WUE): a green grid datacenter sustainability metric", *The Green Grid*, 32, <https://www.thegreengrid.org/en/resources/library-and-tools/238-Water-Usage-Effectiveness-%28WUE%29%3A-A-Green-Grid-Data-Center-Sustainability-Metric->.
- BALDÉ C.P. *et al.* (2024), "The global e-waste monitor", UNU, ITU & ISWA, <https://ewastemonitor.info/the-global-e-waste-monitor-2024/>.
- COURRIER INTERNATIONAL (2023), « Espagne. En pleine sécheresse, la consommation d'eau du futur *data center* de Meta inquiète », <https://www.courrierinternational.com/article/espagne-en-pleine-secheresse-la-consommation-d-eau-du-futur-data-center-de-meta-inquiete>.
- DATA CENTER DYNAMICS (DCD) (2022), "Drought-stricken Holland discovers Microsoft data center slurped 84m liters of drinking water last year", <https://www.datacenterdynamics.com/en/news/drought-stricken-holland-discovers-microsoft-data-center-slurped-84m-liters-of-drinking-water-last-year/>
- DEDRYVER L. (2020), « La consommation de métaux du numérique : un secteur loin d'être dématérialisé », <https://www.strategie.gouv.fr/publications/consommation-de-metiaux-numerique-un-secteur-loin-detre-dematerialise>.

- EKCHAJZER D., COMBAZ J., LETONDAL C., BORNES L. & VINGERHOEDS R. (2024), "Decision-making under environmental complexity: shifting from avoided impacts of ICT solutions to systems thinking approaches", ICT4S, <https://hal-lara.archives-ouvertes.fr/IMAG/hal-04637677v1>.
- EKVALL T. (2019), "Attributional and consequential life cycle assessment", *In Sustainability Assessment at the XXIst century*, IntechOpen, <https://www.intechopen.com/chapters/69212>.
- FICHER M., BAUER T. & LIGOZAT A.-L (2023), « Les DEEE numériques en France », <https://hal-lara.archives-ouvertes.fr/hal-04098638v1>.
- GNIBGA W. E., CHIEN A. A., BLAVETTE A. & ORGERIE A.-C. (2024), "FlexCoolDC: datacenter cooling flexibility for harmonizing water, energy, carbon, and cost trade-offs", *ACM e-Energy*, <https://hal.science/hal-04581701>.
- GOOGLE (2023), "Google environmental report", <https://sustainability.google/reports/google-2024-environmental-report/>.
- GOOGLE (2024), "Google environmental report", <https://sustainability.google/reports/google-2023-environmental-report/>.
- KARIMI L., YACUEL L., DEGRAFT-JOHNSON J., ASHBY J., GREEN M., RENNER M., BERGMAN A., NORWOOD R. & HICKENBOTTOM K. L. (2022), "Water-energy tradeoffs in data centers: a case study in hot-arid climates", *Resources, Conservation and Recycling*, 181, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344922000428>.
- LI P., YANG J., ISLAM M. A. & REN S. (2023), "Making AI less "thirsty": Uncovering and addressing the secret water footprint of AI models", <https://arxiv.org/abs/2304.03271>.
- LIVINGSTONE G. (2023), "It's pillage': thirsty Uruguayans decry Google's plan to exploit water supply", *The Guardian*, <https://www.theguardian.com/world/2023/jul/11/uruguay-drought-water-google-data-center>.
- MAESELE C., PRADINAUD C., PAYEN S. & ROUX P. (2021), « L'empreinte eau - Memento graphique », <https://hal.inrae.fr/hal-03207737>.
- MARQUET C. (2019), « Binaire béton. Quand les infrastructures numériques aménagent la ville », thèse de doctorat, <https://pastel.hal.science/tel-02486197/>.
- UNESCO (2024), "The United Nations World Water Development Report 2024: water for prosperity and peace; facts, figures and action examples", <https://www.unwater.org/publications/un-world-water-development-report-2024>.
- META (2023), "Meta Sustainability Report", <https://sustainability.fb.com/wp-content/uploads/2023/07/Meta-2023-Sustainability-Report-1.pdf>.
- REIG P., LUO T., CHRISTENSEN E. & SINISTORE J. (2020), "Guidance for calculating water use embedded in purchased electricity", WRI, working paper, <https://www.wri.org/research/guidance-calculating-water-use-embedded-purchased-electricity>.
- RISTIC B., MADANI K. & MAKUCH Z. (2015), "The water footprint of data centers", *Sustainability*, 7(8), 11260-11284, <https://www.mdpi.com/2071-1050/7/8/11260>.
- ROCHE C., THYGESEN K. & BAKER E. (2017), "Mine tailings storage: safety is no accident", UN Environment, GRID-Arendal, https://miningwatch.ca/sites/default/files/2017-11-uneppgrid-minetailingssafety-finalreport_0.pdf.
- ROUSSILHE G. (2021), « Eau et puces électroniques : l'avenir climatique et industriel de Taïwan », <https://gauthierroussilhe.com/articles/eau-et-puces-electroniques-l-avenir-climatique-et-industriel-de-taiwan>.
- STMICROELECTRONICS (2021), « Déclaration environnementale », site de Crolles, Rapport technique, ST Microelectronics, https://www.st.com/content/ccc/resource/corporate/company_promotion/site_brochure/group0/8e/01/30/41/7f/46/4c/9f/EMAS_Declaration_Crolles_2021/files/Crolles_EMAS_declaration_2021.pdf/_jcr_content/translatio ns/en.Crolles_EMAS_declaration_2021.pdf.
- TSMC (2019), "TSMC Corporate Social Responsibility Report", https://esg.tsmc.com/file/public/e-all_2019.pdf.
- ZHANG, M. (2024), "Data Center water usage: a comprehensive guide", <https://dgtlinfra.com/data-center-water-usage/>.