

Enjeux autour de l'impact environnemental des humanités numériques

Challenges surrounding the environmental impact of digital humanities

Aurèle Nicolet¹

¹Filière Information science, Haute école de gestion de Genève (HEG-GE)
Haute école spécialisée de Suisse occidentale (HES-SO),
Rue de la Tambourine 17, 1227 Carouge, Suisse,
(ORCID 0000-0003-3501-427X, aurele.nicolet@hesge.ch)

Résumé

Le développement durable constitue un enjeu majeur des prochaines années, pour l'ensemble des activités humaines ; celles relatives à la recherche scientifique n'y échappent pas. Cet article se penche sur les enjeux environnementaux des humanités numériques. L'article est constitué de trois parties. La première partie de l'article expose le contexte et les enjeux autour de l'impact du monde numérique en général sur l'environnement. La deuxième partie de l'article s'intéresse plus précisément à l'impact environnemental des humanités numériques autour de trois axes : la numérisation, l'exploitation et la pérennisation des données. Enfin, la troisième partie expose brièvement quelques initiatives issues du domaine archivistique.

Mots clés : Données gouvernementales ouvertes ; Humanités numériques ; Gouvernance des données ; Organismes info-culturels ; Plateforme open data ; Maroc

Abstract

Sustainable development will be a major issue in the coming years for all human activities; those related to scientific research are no exception. This article focuses on the environmental issues of digital humanities. The article consists of three parts. The first part of the article exposes the context and the issues surrounding the impact of the digital world in general on the environment. The second part of the article focuses more specifically on the environmental impact of digital humanities around three axes: digitization, exploitation and long-term preservation of data. Finally, the third part briefly presents some initiatives from the archival field.

Keywords: Digital Humanities; Environmental impact; Research Data; Research Data Management; Information Governance

Introduction

Bien que la question de l'ouverture de la science ne soit pas un sujet nouveau et trouve ses racines dans la mise en place des premières revues scientifiques en Europe à partir du milieu du XVII^e siècle (Ramachandran, Bugbee, Murphy, 2021), le mouvement de science ouverte (*Open Science*) s'est principalement développé au cours des trente dernières années, en commençant par l'ouverture de l'accès (*Open Access*) aux publications scientifiques, notamment via l'Initiative de Budapest pour l'accès ouvert en 2001 et la Déclaration de Berlin en 2003. Toutefois, le concept de science ouverte est plus large et englobe davantage d'aspects, comme la mesure de l'impact ou le renforcement des infrastructures pour améliorer le partage des recherches (Ramachandran, Bugbee, Murphy, 2021), qui ne seront pas abordés ici.

Une science ouverte offre plusieurs avantages, comme l'accélération de la recherche scientifique ou une meilleure communication entre les disciplines (Ramachandran, Bugbee, Murphy, 2021). Ainsi, le partage de données de recherche concernant des virus, comme Ebola (Burgelman et al., 2019) ou la Covid-19 (Cobelens et al., 2022) a permis le développement rapide de vaccins.

C'est pourquoi, les institutions académiques et les organismes de financement se montrent de plus en plus intéressés à la question de la durabilité de la recherche, notamment la pérennité des données de la recherche.

Cela s'est tout d'abord traduit par une incitation à réaliser un plan de gestion des données de la recherche ou *data management plan (DMP)*. Cette incitation s'est ensuite muée en exigence. Depuis 2017, les chercheurs et chercheuses ont l'obligation de fournir un plan de gestion des données dans leur demande de financement.

Si l'accent a d'abord été mis sur une durabilité des données de recherche, dans le sens d'une pérennité sur le long terme, l'intérêt pour une durabilité au sens écologique se développe depuis quelques années en raison de la problématique de plus en plus pressante du changement climatique. Toutefois, pour assurer une durabilité des données de la recherche, au sens écologique du terme, il est d'abord nécessaire de connaître leur impact environnemental afin de pouvoir le réduire au mieux. Or, celui des données de recherche au sens large, et ceux des humanités numériques en particulier, restent encore largement méconnus.

C'est pourquoi, le présent article vise à contribuer à cette problématique en identifiant les principaux enjeux environnementaux liés aux humanités numériques et en présentant des initiatives qui peuvent servir de pistes de réflexions pour le contrôle et la réduction des impacts environnementaux.

Ce sont les premiers résultats d'une recherche exploratoire, qui vise notamment à caractériser l'impact environnemental au niveau de l'acquisition et du traitement des données et des archives sur l'ensemble de leur cycle de vie, à prospecter les bonnes pratiques en matière de gestion de l'information. Cette recherche se base notamment sur une revue de littérature, incluant aussi bien des articles de recherche que des normes, autour des thématiques des données de la recherche, en particulier celles liées aux humanités numériques, de l'impact environnemental du numérique ou encore du Green IT.

Dans les pages qui suivent, nous exposerons tout d'abord le contexte et les enjeux autour de l'impact du monde numérique en général sur l'environnement en y définissant les concepts clés. Dans un deuxième temps, nous intéresserons plus précisément à la

problématique de l'article, l'impact environnemental des humanités numériques, autour de trois axes : la numérisation, l'exploitation et la pérennisation des données. Enfin, nous exposerons brièvement quelques initiatives issues du domaine archivistique.

Principales caractéristiques du monde numérique

La donnée peut être considérée comme « la plus petite unité significative d'information¹ » (InterPARES Trust, 2018). Tout comme l'information, la donnée n'est pas définie par un support (Society of American Archivists, 2022) et peut ainsi être aussi bien numérique qu'analogique. Dans le cadre de cet article, nous nous concentrerons sur le numérique, qui comprend aussi bien les « données représentées par des chiffres [que] les processus et les unités fonctionnelles qui utilisent ces données » (Organisation internationale de normalisation, 2015a). De ce fait, les données numériques nécessitent des appareils pour être générées, mais également pour être lues, contrairement à des supports comme la pierre, le parchemin, le papier ou même la pellicule, qui sont accessibles à la lecture par un être humain sans nécessiter d'appareil.

Le monde numérique, compris comme l'ensemble des équipements électroniques utilisant des données binaires, peut se diviser en trois grandes parties (Bordage, 2019, pp. 8 et 9) :

- les **utilisateurs**, qui regroupe les différents équipements informatiques, comme les smartphones, les ordinateurs, ou les objets connectés, soit environ 34 milliards d'appareils ;
- les **réseaux**, qui regroupent les éléments permettant de relier l'équipement des utilisateurs aux centres de données, « [s]oit 1,1 milliard de box DSL / fibre, 10 millions d'antennes relais (2G à 5G) et environ 200 millions d'autres équipements actifs réseau WAN (réseau étendu hors les murs) et LAN (réseau local dans les murs) » (Bordage, 2019, p.8.), ce qui correspond en tout à environ 1,31 milliards d'équipements ;
- les **centres informatiques**, qui regroupent les baies de stockage et les serveurs, soit environ 67 millions de serveurs hébergés.

Au fur et à mesure du développement de l'informatique, le volume de données générées chaque année a augmenté et s'est même accéléré, « passant de 2 zettaoctets en 2010 à 64 zettaoctets [en 2020] » (Gaudiaut, 2021). Nicolet et al. (2022) expliquent cette croissance quasi exponentielle par différents facteurs tels que :

- l'augmentation de la taille des applications mobiles et des pages Web ou de nouveaux usages plus gourmands en énergie, comme le streaming de vidéos ;
- l'essor de la transformation numérique qui entraîne une dématérialisation des supports et des processus, accélérée par la crise sanitaire liée au COVID-19 ;
- l'exploitation des données à travers le Big Data par les entreprises et les institutions afin de les aider à la prise de décision.

Cependant, le recours au Big Data ne se limite pas seulement aux entreprises, mais touche également le domaine de la recherche scientifique (Canals et Lopez-Borrull, 2017). Bien que l'astrophysique, la physique des énergies ou la génomique puissent être considérées comme des pionnières dans le domaine (Canals et Lopez-Borrull, 2017), l'exploitation de

¹ Notre traduction

données massives n'est pas l'apanage des sciences dures, comme nous aurons l'occasion le voir en troisième partie.

Impacts environnementaux du numérique

Nous entendons l'impact environnemental comme la « modification de l'environnement, négative ou bénéfique, résultant totalement ou partiellement des aspects environnementaux d'un organisme » (Organisation internationale de normalisation, 2015b, p. 3). Un impact négatif peut notamment se traduire par l'empreinte écologique qui « mesure la quantité de surface terrestre bioproductive nécessaire pour produire les biens et services que nous consommons et absorber les déchets que nous produisons » (WWF, 2020) ou l'empreinte carbone qui correspond à la « somme des émissions et des captations de GES [gaz à effet de serre] dans un système de produits, exprimée en équivalent CO₂ et fondée sur une analyse du cycle de vie prenant pour seule catégorie d'impact le changement climatique » (Organisation internationale de normalisation, 2018, p. 2). C'est cette dernière qui est souvent utilisée pour illustrer l'impact environnemental d'un produit ou d'un organisme.

Dans le cadre du numérique, l'empreinte (écologique ou carbone) s'exerce à travers la fabrication l'utilisation et l'élimination du matériel informatique (hardware). Les données elles-mêmes et les logiciels (software) exercent une influence plus indirecte, selon leur degré de sollicitation du matériel, comme un recours à une plus grande puissance de calcul ou une extension de l'espace de stockage.

Fabrication

Le matériel informatique est particulièrement complexe et composé de plusieurs dizaines de composants variés (Geldron, 2016). On y retrouve des plastiques et des matières synthétiques ; du verre et de la céramique ; des métaux ferreux et non ferreux (cuivre, aluminium, zinc, étain, chrome, nickel...), métaux précieux (or, argent, platine, palladium...) et des terres rares (europium, yttrium, terbium, gallium...) (ADEME, 2019, p. 12).

Les métaux et les terres rares requiert l'extraction d'une quantité importante de matière, environ 800 kg pour les composants d'un ordinateur portable (ADEME, 2019, p. 6). Cela demande de l'énergie et des traitements chimiques, et dans le cas des terres rares génère en plus une pollution radioactive due à la nature de ces éléments (ADEME, 2020). Bien que cela ne rentre pas dans le calcul de l'empreinte carbone, il faut également ajouter que les conditions de travail dans les mines et les manufactures sont très souvent mauvaises (Lèbre et al., 2020).

Ainsi, la phase de fabrication s'avère la plus impactante pour l'environnement. Par exemple, l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) (2019, p. 6) estime l'empreinte carbone d'un ordinateur portable à 169 kg de CO₂ pour l'ensemble de son cycle de vie, dont 124 kg rien que pour sa fabrication, soit pratiquement les trois-quarts (73%) de son empreinte.

Utilisation

Lors de la phase d'utilisation, l'impact environnemental du monde numérique se traduit principalement par deux éléments : les moyens nécessaires pour produire l'électricité alimentant les appareils et le système de refroidissement des centres informatiques (Pendergrasse *et al.*, 2019 ; Lucivero, 2020). Or, les moyens pour produire l'électricité qui

les alimentent dépend encore largement d'énergies fossiles, comme le charbon (Pendergrasse *et al.*, 2019).

Élimination

Le cycle de vie se termine par la phase d'élimination. Les déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) ou *electronic wastes (e-wastes)* rassemblent aussi bien les réfrigérateurs que les smartphones. En 2019, ils représentaient 53.6 millions de tonnes dont seulement 9.3 millions de tonnes (17.4%) ont été correctement récoltés et recyclés (Chakraborty *et al.*, 2022), et une production de 74.7 millions de tonnes de déchets est attendue pour 2030 (Chakraborty *et al.* 2022). Plusieurs raisons sont avancées pour une telle augmentation, comme les progrès réalisés dans l'industrie des technologies de l'information et de la communication ou encore la baisse de prix de l'équipement électronique (Chakraborty *et al.*, 2022).

Bien que le recyclage des DEEE s'avère particulièrement complexe en raison de la toxicité et de la diversité des matériaux (déjà évoquée lors de la phase de la fabrication), il offre plusieurs avantages. Tout d'abord, il permet de réduire significativement l'empreinte carbone au niveau de l'extraction des composants que nous avons évoqués deux paragraphes plus hauts ; il peut également offrir une bonne opportunité pour des emplois (Lèbre *et al.*, 2020). Enfin, le recyclage peut également lutter contre la pénurie qui risque d'y avoir sur certains matériaux. Les montagnes de déchets deviennent ainsi des « mines urbaines » (Geldron, 2016).

Comme nous avons pu le constater au détour de ces quelques paragraphes, l'empreinte qu'exerce le monde numérique sur l'environnement n'est de loin pas négligeable. Bordage (2019) l'estime deux à trois fois celle de la France. Quelle part prend les données de la recherche, en particulier celles relatives aux humanités numériques ? Il nous est difficile de répondre, faute de métriques suffisantes. Nous souhaitons toutefois exposer dans les paragraphes qui suivent en quoi les humanités numériques peuvent impacter l'environnement et ce que peuvent apporter l'archivistique et la gouvernance de l'information à cette problématique.

Humanités numériques et impacts environnementaux

Champ de recherche interdisciplinaire à la croisée des sciences humaines, de l'information et de l'informatique (Edmond et Lehmann, 2021), les humanités numériques forment un sujet vaste dont nous ne prétendons pas présenter ici toute la complexité. Nous reprenons la définition de Vinck (2020) qui considère les humanités numériques comme « [l'e]nsemble des disciplines scientifiques qui s'efforcent de saisir et de formaliser, par les outils et le calcul informatiques, les cultures et les dynamiques sociales, passées, présentes et en émergence ».

Trois moments nous semblent importants pour étudier la question de l'impact environnemental des humanités numériques : celui de l'acquisition des données, notamment via la numérisation, celui de l'exploitation des données par les machines et celui de la pérennisation des données.

Numérisation

Terras (2012) considère la numérisation comme l'une des fondations (*bedrock*) des humanités numériques. Bien que la numérisation de livres et de documents d'archives

papier soit celle qui nous vient le plus facilement en tête, elle n'est pas la seule existante. La numérisation peut aussi concerner les documents audiovisuels et les objets en trois dimensions.

Technique développée durant ces dernières vingt années, la numérisation tridimensionnelle mesure le positionnement de plusieurs points et permet ainsi de recréer un objet en trois dimensions (Robson et al., 2012). Toutes sortes d'objets peuvent ainsi être analysés et recréés : des statues (Wang, 2015) ou des bâtiments (Deligiorgi et al., 2021). La numérisation demande encore des appareils complexes pour les objets de grande taille, mais des applications smartphones se développent pour des objets de plus modeste dimension.

La numérisation de documents papier demande à prendre en compte différents paramètres techniques, tels que la résolution, la colorimétrie, la profondeur d'acquisition, le format informatique des fichiers ou encore le type et le taux de compression (Hategekimana, 2022). Ces différents éléments influencent fortement le poids des fichiers. Par exemple, la profondeur d'analyse définit le codage des couleurs de chaque pixel selon un certain nombre de bits : 1 pour le mode bitonal, 8 pour le mode niveaux de gris et 24 pour le mode couleur. Ainsi, rien que le choix d'un mode peut entraîner la multiplication (jusqu'à 24) du poids d'un fichier (Hategekimana, 2022).

À l'inverse, la numérisation, en offrant la possibilité de consulter des documents à distance, permet de limiter les déplacements des chercheurs et chercheuses, un impact environnemental des archives identifié lors d'une enquête britannique sur les pratiques archivistiques et la durabilité environnementale (Robinson, 2021).

Exploitation des données

La caractéristique phare des humanités numériques est le recours aux outils et calcul informatiques pour analyser de grandes quantités de documents pour lesquels les méthodes humanistes classiques seraient tout simplement inadéquates (Eijnatten, Pieters, Verheul 2013, p. 57).

Même si tous les projets en humanités numériques n'ont pas l'ambition de numériser et analyser à l'aide du machine-learning plus d'un millénaire d'archives, comme celui de *Venice Time Machine* (Abbott 2017), l'analyse massive de données demande des ressources en puissance de calcul et en énergie, ce qui a un impact environnemental (Lucivero, 2020).

C'est pourquoi, les centres de recherche commencent à s'intéresser à cette question et à réfléchir à comment rendre plus durable le recours au Big Data. Ainsi, le CERN s'est intéressé à développer un Big Data plus vert à travers une approche tripartite ciblant les utilisateurs finaux, les développeurs et les gestionnaires des centres de données (Niemi et al. 2018) ; car les améliorations de performance ne sont pas à faire seulement sur le matériel (*hardware*), mais également sur les algorithmes eux-mêmes. Par exemple, des recherches ont été faites pour améliorer la performance et réduire la consommation d'énergie des systèmes de *text mining* (Karam, Puri, Bhunia, 2016).

Pérennisation

La pérennisation est un enjeu crucial (Edmond, Morselli, 2020) et pose la question de l'accessibilité des données de la recherche à long terme, une accessibilité non seulement technique, mais également cognitive (Makhlouf Shabou et al., 2020, pp. 197-198). En

effet, il est important que le contexte et les conditions de production des données restent aussi connus, afin que les personnes souhaitant réutiliser ces données puissent le faire en toute connaissance de cause.

Au niveau technique, la pérennisation des données implique une redondance des sauvegardes (copie d'archivage, de diffusion...) et une migration régulière des supports en raison de l'usure du matériel ou surtout de l'évolution de celui-ci. Or, les infrastructures sont souvent gourmandes en énergie (Bussel et al., 2015), car elles fonctionnent en continu, bien que les données qu'elles hébergent n'aient pas besoin d'être accessibles à tout moment (Laura et al., 2010). Dans ces cas-là, un système de stockage à froid (*cold data storage*), c'est-à-dire possédant un délai dans l'écriture et la lecture des informations qui y sont enregistrées, pourraient être plus appropriées.

Initiatives dans le domaine archivistique

Face au défi de la durabilité (au sens écologique), plusieurs initiatives se sont développées spécifiquement pour réduire l'impact du numérique sur l'environnement. Ainsi, depuis une dizaine d'années, les technologies de l'information cherchent à développer une informatique plus verte (*Green IT* et *Green IS*). Le domaine des archives s'y intéresse également, mais le mouvement a été initié plus tard, comparativement à d'autres institutions patrimoniales, telles que les bibliothèques ou les musées (Robinson 2021).

Bussel et Smit (2014) ont cherché à proposer un modèle d'archivage vert (*Green Archive Model*) combinant les éléments relatifs à l'informatique verte (*Green Computing*) à des éléments relatifs à l'évaluation archivistique. En effet, l'évaluation est une fonction clé, car elle permet de déterminer la durée de conservation des archives et leur sort final (conservation *ad aeternam* ou élimination). C'est pourquoi, Pendergrasse et al. (2019) appellent à revoir l'évaluation des archives de façon plus drastique. En 2022, une équipe de la Haute école de gestion de Genève (HEG HES-SO) a travaillé sur un modèle visant à évaluer la maturité de l'évaluation archivistique au sein d'une organisation (Makhlouf Shabou, 2022) afin d'en permettre l'amélioration. Dans le modèle figurent la réflexion de la réévaluation des archives et la prise en compte de la durabilité à la fois dans le sens écologique que de pérennité à long terme.

Tout récemment, Kinnaman et Munshower (2022) se sont notamment intéressés à estimer la consommation d'énergie et d'émission carbone du calcul de la somme de contrôle (checksum) utilisée pour vérifier l'intégrité des documents numériques, alors que Wijsman et al. (2022) se sont penchés sur les émissions de carbone liées au stockage et à l'utilisation des objets numériques et des données.

Toutefois, ces initiatives restent souvent limitées à un domaine, comme les technologies de l'information ou l'archivistique. Il semble pour le moment qu'il n'existe pas de vision d'ensemble. Or, il nous apparaît important et nécessaire de s'intéresser aux données dans leur globalité, à la fois :

- **temporelle**, en couvrant l'ensemble de leur cycle de vie, de leur création ou leur capture à leur conservation pérenne ou leur élimination ;
- **multidimensionnelle** (archivistique, juridique, technique, technologique, économique, etc.).

La gouvernance informationnelle, par son approche stratégique et multidimensionnelle de l'information (Makhlouf Shabou et Lomas, 2019), a un rôle à jouer pour prendre de la

hauteur et développer une vision plus englobante de la problématique écologique des données numériques. La récente norme (ISO 24143), définissant le concept et les principes de la gouvernance de l'information, l'a bien compris en proposant comme quinzième principe la contribution au développement durable (Organisation internationale de normalisation 2022).

Conclusion

Comme toute activité humaine, le numérique exerce un impact sur l'environnement dont la grande majorité se situe au moment de la fabrication du matériel électronique, en raison de l'extraction importante de matière requérant énergie et traitement chimique.

Les humanités numériques participent à cet impact, même s'il est actuellement difficile de le mesurer précisément, car les indicateurs et métriques nécessaires ne sont pas encore clairement définis. Cependant, trois moments clefs ont pu être identifiés :

- ✓ **l'acquisition des données, via la numérisation**, qui est un élément fondateur et particulièrement important, car des choix effectués à ce moment-là auront des conséquences sur les deux autres éléments clefs, comme par exemple les paramètres de numérisation qui influent sur le poids des fichiers ;
- ✓ **l'exploitation des données par les machines**, qui est au cœur des humanités numériques et requiert d'importantes ressources en puissance de calcul et en énergie ;
- ✓ **la pérennisation des données**, qui implique une redondance des données, une migration régulière des supports en raison de l'évolution du matériel et souvent une consommation d'énergie en continu même pour des données ne nécessitant pas un accès un régulier.

Depuis environ une dizaine d'années, plusieurs initiatives des technologies de l'information cherchent à proposer un modèle plus durable que ce soit en matière de conception ou de réutilisation de matériel. Du côté des sciences de l'information, et plus particulièrement de l'archivistique, une fonction s'avère centrale, celle de l'évaluation ; car si elle permet traditionnellement de déterminer la durée de conservation et le sort final des archives, elle s'intéresse avant tout à estimer la valeur des documents et par exemple le degré de redondance nécessaire à leur accessibilité et conservation.

Cependant, ces initiatives s'intéressent souvent à une problématique précise et manquent d'une vision d'ensemble. Or c'est un élément essentiel, car l'impact environnemental est un sujet complexe qui fait intervenir bien des acteurs et des domaines d'expertise et demande d'avoir une démarche systémique. Par son approche multidimensionnelle, la gouvernance de l'information a un rôle à jouer. Armé de cette vision stratégique, les organismes de recherche pourraient ainsi coordonner leurs efforts et aider les chercheurs et chercheuses à gérer les données de recherche qu'ils et elles produisent sur le long terme.

Remerciements

L'auteur tient à remercier Basma Makhoulf Shabou pour l'avoir orienté sur la thématique des coûts écologiques des données et des archives pour son projet de doctorat et les organisateurs du CIHN pour leur gentillesse et leur accueil.

Références

- Abbott, A. (2017). The ‘time machine’ reconstructing ancient Venice’s social networks. *Nature*, 546(7658), 341-344. <https://doi.org/10.1038/546341a>
- Agence de l’Environnement et de la Maîtrise de l’Énergie. (2018, octobre 23). *Ces objets qui pèsent lourd dans notre quotidien*. <http://multimedia.ademe.fr/infographies/infographie-poids-carbone/>
- Agence de l’Environnement et de la Maîtrise de l’Énergie. (2019). *La Face cachée du numérique : Réduire les impacts du numérique sur l’environnement*. Agence de l’Environnement et de la Maîtrise de l’Énergie. <https://librairie.ademe.fr/cadic/2351/guide-pratique-face-cachee-numerique.pdf>
- Bordage, F. (2019). *Empreinte environnementale du numérique mondial*. GreenIT. https://www.greenit.fr/wp-content/uploads/2019/10/2019-10-GREENIT-etude_EENM-rapport-accessible.VF.pdf
- Burgelman, J.-C., Pascu, C., Szkuta, K., Von Schomberg, R., Karalopoulos, A., Repanas, K., & Schoupe, M. (2019). Open Science, Open Data, and Open Scholarship : European Policies to Make Science Fit for the Twenty-First Century. *Frontiers in Big Data*, 2, 43. <https://doi.org/10.3389/fdata.2019.00043>
- Bussel, G.-J. van, Smit, N., & Pas, J. van de. (2015). Digital Archiving, Green IT and Environment. Deleting Data to Manage Critical Effects of the Data Deluge. *The Electronic Journal Information Systems Evaluation*, 18(2), 188-199.
- Canals, A., & Lopez-Borrull, A. (2017). Big data for Scientific Knowledge. In F. Marimon Viadiu, M. Mas-Machuca, J. Berbegal-Mirabent, & R. Bastida Vialcanet (Éds.), *Proceedings of the 18th European Conference on Knowledge Management (ECKM 2017)* (p. 197-205). Academic Conferences and Publishing International Limited.
- Chakraborty, S. C., Qamruzzaman, M., Zaman, M. W. U., Alam, M. M., Hossain, M. D., Pramanik, B. K., Nguyen, L. N., Nghiem, L. D., Ahmed, M. F., Zhou, J. L., Mondal, Md. Ibrahim, H., Hossain, M. A., Johir, M. A. H., Ahmed, M. B., Sithi, J. A., Zargar, M., & Moni, M. A. (2022). Metals in e-waste : Occurrence, fate, impacts and remediation technologies. *Process Safety and Environmental Protection*, 162, 230-252. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.04.011>
- Cobelens, F., Suri, R. K., Helinski, M., Makanga, M., Weinberg, A. L., Schaffmeister, B., Deege, F., & Hatherill, M. (2022). Accelerating research and development of new vaccines against tuberculosis : A global roadmap. *The Lancet Infectious Diseases*, 22(4), e108-e120. [https://doi.org/10.1016/S1473-3099\(21\)00810-0](https://doi.org/10.1016/S1473-3099(21)00810-0)
- Deligiorgi, M., Maslioukova, M. I., Averkiou, M., Andreou, A. C., Selvaraju, P., Kalogerakis, E., Patow, G., Chrysanthou, Y., & Artopoulos, G. (2021). A 3D digitisation workflow for architecture-specific annotation of built heritage. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 37, 102787. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2020.102787>
- Edmond, J., & Lehmann, J. (2021). Digital humanities, knowledge complexity, and the five ‘aporias’ of digital research. *Digital Scholarship in the Humanities*, 36(Supplement_2), ii95-ii108. <https://doi.org/10.1093/llc/fqab031>
- Edmond, J., & Morselli, F. (2020). Sustainability of digital humanities projects as a publication and documentation challenge. *Journal of Documentation*, 76(5), 1019-1031. <https://doi.org/10.1108/JD-12-2019-0232>
- Eijnatten, J. van, Pieters, T., & Verheul, J. (2013). Big Data for Global History : The Transformative Promise of Digital Humanities. *BMGN - Low Countries Historical Review*, 128(4), 55-77. <https://doi.org/10.18352/bmgn-lchr.9350>

- Gaudiaut, T. (2021, octobre 19). *Le Big Bang du Big Data*. Statista Infographies. <https://fr.statista.com/infographie/17800/big-data-evolution-volume-donnees-numeriques-genere-dans-le-monde/>
- Geldron, A. (2016). Métaux stratégiques : La mine urbaine française: *Annales des Mines - Responsabilité et environnement*, N° 82(2), 67-73. <https://doi.org/10.3917/re1.082.0067>
- Hategekimana, A. (2022). *Conception d'un service de numérisation pour ArchiLab* [Travail de Master]. Haute école de gestion de Genève. <https://sonar.ch/global/documents/322897>
- InterPARES Trust. (2018). *Data*. Terminology Database. <https://interparestrustai.org/terminology/term/data>
- Kinnaman, A., & Munshower, A. (2022). Green Goes with Anything: Decreasing Environmental Impact of Digital Libraries at Virginia Tech. *iPres 2022: The 18th International Conference on Digital Preservation*. <https://az659834.vo.msecnd.net/eventsairwesteuprod/production-inconferencepublic/041b9d71a3e245a3b824a82f8f6752c1>
- Laura, F., Coelho, F., & Delmond, M.-H. (2010, mai 19). *Gestion durable des données : Point sur les enjeux et proposition d'une démarche de pilotage de la performance appuyée sur un balanced scorecard thématique*. 15e colloque AIM, La Rochelle. <https://hal-hec.archives-ouvertes.fr/hal-00554061>
- Lèbre, É., Stringer, M., Svobodova, K., Owen, J. R., Kemp, D., Côte, C., Arratia-Solar, A., & Valenta, R. K. (2020). The social and environmental complexities of extracting energy transition metals. *Nature Communications*, 11(1), 4823. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18661-9>
- Lucivero, F. (2020). Big Data, Big Waste? A Reflection on the Environmental Sustainability of Big Data Initiatives. *Science and Engineering Ethics*, 26(2), 1009-1030. <https://doi.org/10.1007/s11948-019-00171-7>
- Makhlouf Shabou, B. (2022, mai 25). *Évaluation de l'évaluation des données et des archives : Méthode et modèle de maturité*. 51e Congrès de l'Association des Archivistes du Québec, Saint-Hyacinthe.
- Makhlouf Shabou, B., & Lomas, E. (2019). Strategies, methods and tools enabling records governance in a cloud environment. In L. Duranti & C. Rogers (Éds.), *Trusting Records and Data in the Cloud*. Facet Publishing.
- Makhlouf Shabou, B., Tièche, J., Knafou, J., & Gaudinat, A. (2020). Algorithmic methods to explore the automation of the appraisal of structured and unstructured digital data. *Records Management Journal*, 30(2), 175-200. <https://doi.org/10.1108/RMJ-09-2019-0049>
- Nicolet, A., Crausaz, E., Jaomazava, E., & Sieber, A. (2022). Identification et prise en compte de l'impact environnemental des données numériques : Un nouveau défi pour la gouvernance de l'information. In G. Chartron, M. Ihadjadene, & E. Broudoux (Éds.), *Données documents connaissances perspectives de recherche et d'enseignement : Actes du 22e colloque international sur le document numérique. 9-10 décembre 2021 | CNAM - Paris-France* (p. 270-289). Europia.
- Niemi, T., Nurminen, J. K., Liukkonen, J.-M., & Hameri, A.-P. (2018). Towards Green Big Data at CERN. *Future Generation Computer Systems*, 81, 103-113. <https://doi.org/10.1016/j.future.2017.11.001>
- Organisation internationale de normalisation. (2015a). *Technologies de l'information—Vocabulaire*. ISO/IEC 2382.
- Organisation internationale de normalisation. (2015b). *Systèmes de management environnemental – Exigences et lignes directrices pour son utilisation*. ISO 14001.
- Organisation internationale de normalisation. (2018). *Gaz à effet de serre—Empreinte carbone des produits—Exigences et lignes directrices pour la quantification*. ISO 14067.

- Organisation internationale de normalisation. (2022). *Information et documentation—Gouvernance de l'information—Concept et principes*. ISO/DIS 24143.
- Pendergrass, K. L., Sampson, W., Walsh, T., & Alagna, L. (2019). Toward Environmentally Sustainable Digital Preservation. *The American Archivist*, 82(1), 165-206.
<https://doi.org/10.17723/0360-9081-82.1.165>
- Ramachandran, R., Bugbee, K., & Murphy, K. (2021). From Open Data to Open Science. *Earth and Space Science*, 8(5). <https://doi.org/10.1029/2020EA001562>
- Robinson, G. (2021). Come hell or high water : Climate action by archives, records and cultural heritage professionals in the United Kingdom. *Records Management Journal*, 31(3), 314-340.
<https://doi.org/10.1108/RMJ-10-2020-0036>
- Robson, S., MacDonald, S., Were, G., & Hess, M. (2012). 3D recording and museums. In C. Warwick, M. M. Terras, & J. Nyhan (Éds.), *Digital humanities in practice* (p. 91-116). Facet Publishing in association with UCL Centre for Digital Humanities.
- Terras, M. M. (2012). Digitization and digital resources in the humanities. In C. Warwick, M. M. Terras, & J. Nyhan (Éds.), *Digital humanities in practice* (p. 47-70). Facet Publishing in association with UCL Centre for Digital Humanities.
- Vinck, D. (2020). *Humanités numériques : La culture face aux nouvelles technologies* (2e éd. revue et augmentée). le Cavalier bleu éditions.
<https://hesge.scholarvox.com/catalog/book/docid/88913208>
- Wang, N. (2015). Analysis on the Innovation to Sculpting with the Aid of 3D Digital Technology. *Proceedings of the 2015 International Conference on Arts, Design and Contemporary Education*. 2015 International Conference on Arts, Design and Contemporary Education, Moscow, Russia.
<https://doi.org/10.2991/icadce-15.2015.109>
- Wijsman, L., Groen, A., Zwol, T. & Gillisse, R. (2022). The CO2 Emissions of Storage and Use of Digital Objects and Data. *iPres 2022: The 18th International Conference on Digital Preservation*. <https://az659834.vo.msecnd.net/eventsairwesteuprod/production-inconferencepublic/42719d2ec53c4bc9b4a66e2b48963544>
- World Wide Fund for Nature (WWF). (s. d.). *Qu'est-ce que l'empreinte écologique?* WWF.
https://wwf.panda.org/fr/wwf_action_themes/modes_de_vie_durable/empreinte_ecologique/