

L'analyse de cycle de vie de services numériques sur systèmes distribués : définitions et enjeux

Adrien Berthelot *

ENS de Lyon,
Laboratoire LIP - 46 allée d'Italie
69007 Lyon - France
adrien.berthelot@ens-lyon.fr

OCTO Technology,
34 avenue de l'Opéra
75002 Paris - France

Résumé

Notre monde est actuellement sous l'influence de deux transitions : une transition numérique conséquence et moteur de l'évolution technologique et économique de la société et une transition écologique répondant au besoin de plus en plus urgent de construire une société environnementalement soutenable. Cependant une question se pose alors "Est-il possible de concilier transition numérique et transition écologique?". Conséquence des problématiques environnementales de plus en plus prégnantes dans notre société, on observe depuis bientôt 20 ans l'émergence dans le monde académique de recherches sur la manière de réduire les impacts du numérique pouvant nuire à une société durable. Premier enjeu de cet objectif : la mesure énergétique. La recherche a produit de nombreux outils et modèles afin de mieux évaluer la consommation électrique à l'usage des équipements et infrastructures. Toutefois cette donnée précieuse ne donne qu'un aperçu partiel de l'ensemble des impacts. De plus, elle devient plus difficile à évaluer lorsque les consommateurs sont utilisateurs non pas d'équipements ou logiciels individuels mais de systèmes distribués proposant de multiples services numériques. Afin de compléter ces études de mesures, on observe depuis une dizaine d'années l'utilisation grandissante de l'Analyse de Cycle de Vie (ACV) comme méthodologie d'appui dans la littérature. Le but de cet article est d'observer comment l'ACV a contribué à enrichir la mesure d'impacts environnementaux et plus largement la recherche sur le numérique éco-responsable. Nous verrons au regard de la littérature existante les emprunts faits à cette méthode. Il sera aussi question d'évaluer les perspectives actuelles de l'évaluation environnementale. L'ACV permet d'éclairer les choix environnementaux en élargissant la vision des études mais elle reste une méthode avec ses imperfections qu'il convient de prendre en compte. Nous essayerons de faire la différence entre les limites relevant de l'application de l'ACV aux services numériques et celles relevant de l'ACV elle-même. L'objectif étant d'explorer comment à l'avenir l'ACV pourra continuer d'enrichir la recherche sur le sujet du numérique responsable, sous quelles formes et avec quelles limites.

Mots-clés : Analyse de Cycle de Vie (ACV), systèmes distribués, numérique éco-responsable, services numériques

*. Basé sur des travaux menés avec Eddy Caron (ENS de Lyon), Laurent Lefèvre (Inria) et Alexis Nicolas (OCTO Technology)

1. Introduction

De la conférence de Rio en 1992 aux accords de Paris en 2015, au rythme des différents rapports du GIEC explicitant les changements climatiques présents et à venir, les objectifs de transition écologique impulsés par la société trouvent leurs échos dans la recherche informatique. On voit ainsi apparaître de nombreuses études portant sur le dimensionnement énergétique des systèmes et logiciels. Exemple de ce phénomène, le groupe de travail du CNRS EcoInfo, est fondé en 2005 et d'abord focalisé sur des questions énergétiques, qui seront ensuite dépassées pour englober l'ensemble des impacts environnementaux du numérique [22, 23]. De même, on voit d'abord apparaître la notion de Power Usage Effectiveness (PUE) en 2007 [7]. Mais cela reste insuffisant au regard des autres enjeux environnementaux liés au numérique : pollution des sols, destruction de la biodiversité, consommation d'eau, raréfaction des métaux, épuisement des énergies fossiles. . . Il devient alors nécessaire d'élargir la vision des impacts du numérique sur l'environnement. Que ce soit pour mieux évaluer les émissions de Gaz à Effet de Serre (GES) avec les impacts en équivalent carbone ou bien pour considérer d'autres problématiques environnementales. Les institutions et législateurs comme l'ADEME, avec la Réglementation par Catégorie de Produit (RCP) [3] pour services numériques, ou la loi REEN [2] sont déjà dans cette philosophie d'élargir la vision des impacts.

En parallèle de ces questions, la méthode ACV, en capacité de répondre de manière plus large à ces problématiques, fait petit à petit son incursion dans la recherche en informatique. Nous allons essayer au regard de l'état de l'art présent de voir comment les études actuelles tentent de sortir de la simple mesure énergétique ou carbone à l'usage et comment l'ACV, entre autres, peut contribuer à cet objectif. Pour finir, nous discuterons des limites et des avantages que la méthode ACV peut apporter à nos travaux.

2. Systèmes distribués et environnement, l'ACV comme moyen d'évaluation plus complet

2.1. ACV : présentation de la méthode

L'ACV est une méthode d'évaluation multi-critères reposant sur les normes ISO 14040² et 14044³ et pouvant s'appuyer sur des normes complémentaires suivant le secteur étudié et les objectifs de l'étude. Elle vise à produire une évaluation des impacts environnementaux potentiels d'un produit ou d'une activité. Elle se caractérise par une approche holistique du problème, considérant tout le cycle de vie du ou des produits étudiés.

L'ACV s'effectue en 4 grandes étapes (Figure 1). Tout d'abord on définit le cadre de l'étude, les frontières du système étudié, son périmètre géographique et temporel, les objectifs de l'étude ainsi que les unités fonctionnelles observées. L'Unité Fonctionnelle (UF) est un indicateur destiné à quantifier la satisfaction d'un besoin au moyen d'une fonction.

Dans un second temps, on procède à l'Inventaire des Cycles de Vie (ICV) et à la comptabilisation des flux élémentaires. Les flux élémentaires entrants et sortants constituent les ressources directement absorbées (par exemple l'énergie) ou rejetées (émissions de gaz à effet de serre) par le système. L'ICV consiste aussi à répertorier les différents produits intervenant dans le système pour satisfaire l'UF. Pour les consigner dans l'inventaire, on fera appel ici à des bases de données d'ICV prêtes ou à des ACV de ces sous-systèmes moins complexes que celui étudié en tant que données dites secondaires [19].

On procède ensuite à l'Analyse des Impacts des Cycles de Vie (AICV). L'AICV, au vue des données (issus de l'inventaire) classe et regroupe les impacts. Elle va, a minima, attribuer à

2. <https://www.iso.org/fr/standard/37456.html>

3. <https://www.iso.org/fr/standard/38498.html>

ces groupes des catégories de problèmes et dommages environnementaux. On parle de caractérisation des impacts. On peut aussi normaliser, voir pondérer les impacts afin de faciliter l'utilisation et la communication des résultats.

La phase finale est l'interprétation des résultats afin de tirer d'éventuelles conclusions. Elle est accompagnée d'une analyse de sensibilité afin d'illustrer le niveau d'incertitude concernant les données choisies et les choix méthodologiques effectués. Il est important de comprendre que l'ACV est un processus itératif visant à affiner l'exactitude et la pertinence de ses approximations, révision après révision.

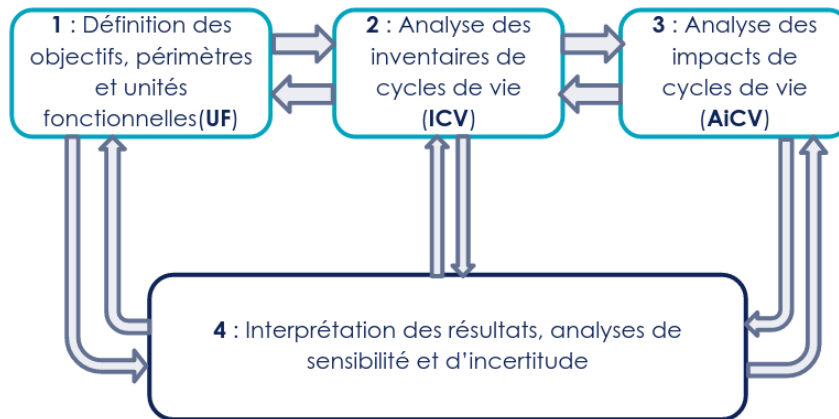


FIGURE 1 – Les quatre étapes de l'ACV

2.2. Incursion progressive de l'ACV de service numérique dans la littérature scientifique

Les études de dimensionnement énergétique des systèmes distribués existent depuis au moins 20 ans [20, 49]. On cherche à mieux évaluer la consommation énergétique des systèmes et à la réduire. Le développement des nombreux Data-Centers (DC) à travers le monde va servir de catalyseur à cet enjeu en offrant un accès à des ressources distantes potentiellement fortement consommatrices en énergie. La consommation électrique devenant un enjeu financier direct on cherche à la réduire, souvent au moyen d'optimisation énergétique, comme l'atteste l'apparition du PUE en 2007, toujours utilisé aujourd'hui. Toutefois, on arrive vite aux limites de cette approche qui néglige d'autres aspects comme les métaux et terres rares [6, 9], les émissions de gaz à effet de serre ou la consommation en eau. Une évolution dans les normes et métriques partagées va permettre d'aborder de manière plus complète ces enjeux inhérents aux systèmes distribués. On note l'apparition des métriques CUE et WUE, respectivement Carbon Usage Effectiveness et Water Usage Effectiveness, en 2010 [15] et 2011 [40] du fait du consortium industriel The Green Grid.

Les parutions des normes L1410 de l'ITU (International Telecom Union) en 2012 [37], ES203199 de l'ETSI (European Telecommunications Standards Institute) en 2014 [17] et des méthodologies d'empreintes environnementales du JRC (Joint Research Centre) [45, 18] amorcent un changement. Avant, les précédentes normes et méthodes d'évaluation se concentraient sur un ou des équipements individuels. À présent, elles vont amener à évaluer les systèmes distribués sous l'angle des services proposés et non comme les simples sommes d'équipements. Cela permet une vision plus juste des systèmes distribués incluant l'usage des infrastructures réseaux et des terminaux des utilisateurs. On peut aussi avec la vision "service" effectuer des dimensionnements à des échelles plus grandes [12, 39, 50] ou bien à l'échelle de l'utilisateur [8, 16, 21]. En dehors du monde académique, l'ACV se répand aussi comme format d'étude [28, 29, 46], encouragé par les législateurs [1, 2, 3, 4].

L'ACV de services, répondant à des besoins, permet alors dans ces études à la fois une vision élargie des problèmes écologiques, tout en incluant un maximum d'équipements et leurs cycles de vie.

3. Limites et défis de l'ACV pour les services numériques

3.1. L'incomplétude de l'ACV de service numérique

Comme nous avons pu le constater, l'utilisation progressive de l'ACV se constate à mesure qu'un travail d'uniformisation et de normalisation est produit par des organismes et institutions au niveau international (Green Grid, ITU, ISO). Si un grand travail a déjà été accompli, d'une part l'aspect contextuel de l'ACV exige un travail de mise à jour continue et spécifique aux contextes d'application de l'ACV [14, 26, 41, 48, 51]. D'autre part, un travail d'harmonisation et d'adaptation est toujours nécessaire afin de couvrir les différents usages spécifiques des systèmes distribués. Par exemple si l'ADEME a publié un référentiel méthodologique [3] pour les services numériques, celui-ci a vocation à être complété par des normes filles couvrant d'autres usages des systèmes distribués (IA, accès internet, site web, blockchain, etc.). L'ACV, telle qu'elle est pratiquée aujourd'hui dans d'autres domaines de l'industrie, est le résultat de décennies d'améliorations des méthodes et modèles depuis les années 70 [13, 35]. Il est alors raisonnable de penser que les ACV de services numériques ont une marge de progression encore importante autant en quantité et pluralité des études qu'en qualité des données et standards disponibles. On peut affirmer que ces gains de maturité amélioreront ces ACV dans les années à venir.

Élément illustrant le mieux l'aspect perfectible de la méthodologie actuelle, les bases de données d'ICV sont encore difficiles à obtenir. Des projets comme NegaOctet sont encore en cours de construction⁴. Plus handicapant, les projets actuels de base d'ICV ne semblent pas s'inscrire pleinement dans une démarche de recherche ouverte et transparente malgré les bénéfices potentiels que cela impliquerait [30, 43].

Il est intéressant de noter cependant que les difficultés d'accès à des données pertinentes de qualité semblent exister depuis l'apparition de la méthode ACV [13, 35]. Cette difficulté se retrouve dans les très nombreux essais de simplification de l'ACV ayant majoritairement comme motivation commune de pallier le manque de données [27].

3.2. Défis pour l'ACV de services numériques aujourd'hui

3.2.1. Allocations et coupures

Pour commencer, l'ACV de services numériques comporte plusieurs problématiques communes aux autres champs d'application. Les données, la vitesse d'exécution ou les périmètres d'études hétérogènes, tous ces aspects sont perfectibles, même si la méthode progresse dans ces domaines. Au sujet de ce dernier point, la vision actuelle en trois groupes, "Terminaux utilisateurs", "réseaux" et "data-center", apparaît s'imposer. Cette homogénéisation du modèle est intéressante pour notamment comparer plusieurs ACV entre elles [34]. Toutefois, elle acte un changement de vision, de l'évaluation de l'ensemble des équipements composant un système distribués à l'évaluation de chaque équipement au regard de sa participation à la satisfaction de l'unité fonctionnelle. Si cette vision "service" a ses avantages, elle a aussi l'inconvénient de faire reposer le problème de l'allocation en partie sur la notion très contextuelle voir fluctuante de "satisfaction du besoin".

L'allocation est d'ailleurs un enjeu plus important dans les ACV de services numériques que

4. <https://negaoctet.org/#Offres>

dans d'autres domaines [5]. L'allocation peut se résumer à comment et dans quelle proportion inclure l'empreinte environnementale d'un équipement participant à satisfaire le service mais aussi d'autres services. Pour des services numériques reposant sur des systèmes distribués et des infrastructures largement mutualisées, ce problème est vu comme un des principaux défis pour l'ACV [10].

S'ajoute à ce défi celui du critère de coupure. Où exactement arrêter d'inclure dans la phase d'ICV? Si l'ACV est une approximation d'impacts potentiels, cela n'évacue pas la question pour autant. Il est question d'inclure dans l'ICV la majorité des systèmes parmi l'ensemble étudiés. Derrière cette notion peuvent se trouver différentes règles, comme couvrir plus de 90% de la consommation énergétique [3] ou bien plus de 95% de la masse des flux intermédiaires [12], quand cette règle est explicitée. Au-delà de la difficulté possible de ne pas inclure et évaluer un élément sous prétexte qu'il serait négligeable, et donc évalué, le problème du critère de coupure se cumule à celui de l'allocation. Il se cumule à ce dernier en rendant plus flou le périmètre de l'ACV et par extension en nuisant à sa standardisation qui permettrait pourtant à l'ACV d'être un outil de comparaison performant [10, 34].

Ces problèmes sont d'autant plus spécifiques à l'ACV de service numérique au vu des dynamiques actuelles. La multiplication des terminaux, leur part croissante dans le bilan environnemental du numérique [33, 36], couplée à la croissance de technologies et d'usages comme les blockchains ou l'IoT [24] ne facilitera pas ces problématiques avec des systèmes toujours plus hétérogènes et distribués.

3.2.2. Communiquer l'incertitude

Comme introduit précédemment, la méthode ACV est un processus itératif exprimant des impacts potentiels de manière quantitative. Elle cherche au fil des itérations à réduire les incertitudes entourant ces valeurs. C'est une méthode contextuelle s'adaptant aux milieux et objectifs de l'étude. Pour cela, une ACV comporte toujours une part de choix de l'évaluateur, par exemple, l'utilisation de données mesurées sur le terrain ou de certains modèles pré-existants. Pour pallier cette incertitude due aux choix ou à la qualité des données, l'ACV prévoit un analyse de sensibilité. Cette étape attribue pour chaque donnée une borne minimale et maximale, à la manière d'un intervalle de confiance. On trouve parfois aussi dans cette section la répercussion de ces intervalles de confiance sur les résultats finaux.

L'analyse de sensibilité est un outil destiné à communiquer l'incertitude inhérente de l'étude. Elle reste trop peu utilisée ou trop peu mise en avant, surtout quand on arrive à des variations de plus de 50% [12]. Pourtant les analyses de sensibilité sont des gages de qualité, d'intégrité et de transparence qui ont la capacité de contribuer à un meilleur travail de recherche [10, 34, 44]. Le simple fait d'afficher frontalement les intervalles de confiance issus de l'analyse de sensibilité pourrait être un premier progrès individuel et collectif pour l'ACV [52].

3.2.3. Tirer le plein potentiel de l'ACV pour les services numériques

En dernier point, nous pouvons émettre l'hypothèse qu'en adoptant de manière plus complète l'ACV, l'évaluation environnementale des services numériques pourrait être améliorée mais aussi contribuer à l'amélioration de l'ACV [31]. En effet, plusieurs études se revendiquant de l'ACV ne l'utilisent que pour évaluer un seul impact comme l'empreinte carbone [21, 33, 50], voire l'utilisent sans définir clairement d'UF [50]. Ces études passent ainsi à côté de plusieurs des principaux bénéfices de l'ACV. C'est l'approche multi-critère qui permet d'éviter l'invisibilisation de certains impacts, voire pire, le transfert de l'empreinte environnementale des impacts évalués vers ceux non-évalués [11]. C'est la définition d'UF qui permet de comparer entre eux des services répondants au même besoin mais différemment.

Actuellement, la littérature semble n'utiliser que trop partiellement l'ensemble des avantages de l'ACV et c'est imputable en partie à l'ACV elle-même. En étant une méthode plastique, aux nombreuses variantes [32], les méthodes plus simples, partielles, comme l'ACV screening [53] sont privilégiées. Néanmoins, cette plasticité de l'ACV pourrait aussi se révéler être un avantage. Il n'est pas à exclure que l'ACV puisse évoluer vers un modèle plus ouvert, participatif et transparent correspondant ainsi à des mentalités plus présentes dans le milieu des services numériques que dans les précédents domaines d'application de l'ACV. L'ACV pourrait alors sortir, comme le conclut [30], d'une interaction homme-ordinateur classique, ancré dans une approche "consommateur individuel", permettant ainsi d'aller vers un nouveau contexte de soutenabilité [42].

4. Conclusion

L'ACV malgré ses défauts s'est installée dans les autres domaines, supplantant d'autres méthodes comme l'Environmental Effect Analysis (EEA) [38]. Dans le domaine des systèmes distribués, après avoir participé à l'évaluation individuelle de chaque élément, les data-centers ont été l'occasion de procéder aux premières évaluations de grands ensembles [53, 54]. À présent, l'ACV cherche plus à évaluer un système distribué dans son ensemble (terminaux, réseaux et data-center) au travers du service qu'il propose. Si précédemment les travaux de dimensionnement énergétique semblaient répondre à un besoin d'optimisation énergétique propre aux systèmes embarqués ou bien directement lucratif pour les data-centers, l'ACV permet d'adresser plus directement la question du développement durable. Évaluer de manière exhaustive les impacts environnementaux d'une solution technologique peut être un premier pas vers un choix plus éclairé de ce que peut le numérique pour la transition écologique [25].

Néanmoins, malgré les capacités d'adaptation de l'ACV et la production de normes et ressources par les institutions, il existe toujours une marge de progression pour que l'ACV puisse pleinement bénéficier à la recherche en informatique responsable. Les systèmes distribués, par leur nature, rendent les périmètres d'études plus flous et plus difficilement harmonisables. Ces incertitudes empêchent la standardisation des études qui rendraient plus efficace le travail collectif d'évaluation des impacts du numérique. Elles gênent aussi la communication des résultats d'ACV, parfois sommaires si la méthode n'a été que partiellement utilisée.

Pourtant, les bénéfices de l'ACV pour l'évaluation environnementale des services numériques sont grands, particulièrement dans un domaine où les impacts se cachent souvent derrière une image d'immatérialité [47]. L'ACV avec une approche globale permet d'approcher le plus grand nombre d'impacts au-delà de la simple empreinte carbone, tout en observant tout le cycle de vie des équipements étudiés. Ces bénéfices sont d'autant plus grands que la méthode ACV relie les études environnementales sur les services numériques aux autres domaines couverts par l'ACV permettant une approche toujours plus globale. L'ACV peut être un outil déterminant pour inscrire le numérique dans une démarche soutenable. La standardisation des ACV de services numériques facilitera, la lecture, l'utilisation et la comparaison du coût environnemental de satisfaction d'un besoin selon une méthode plutôt qu'une autre. Au-delà des efforts de standardisation, les moyens dont disposent le numérique pour monitorer, pour ne pas dire surveiller, ses activités pourraient être employés à fournir de meilleures données d'utilisation et d'allocation des équipements. On pourra aussi envisager ces ACV comme vecteur d'innovation au sein même de la communauté ACV, voir d'être un pont vers la comptabilité écologique. On a ici le potentiel, si l'exercice de l'ACV de services numériques surmonte ses difficultés, d'arriver à des méthodes d'évaluation pouvant être de réels supports à l'aide à la décision selon des critères environnementaux.

Bibliographie

1. Article 13 - LOI n° 2020-105 du 10 février 2020 relative à la lutte contre le gaspillage et à l'économie circulaire (1) - Légifrance, février 2020.
2. LOI n° 2021-1485 du 15 novembre 2021 visant à réduire l'empreinte environnementale du numérique en France (1), novembre 2021.
3. ADEME et NegaOctet. – Référentiel méthodologique d'évaluation environnementale des services numériques, juillet 2021.
4. ADEME et NegaOctet. – Référentiel méthodologique d'évaluation environnementale de la Fourniture d'Accès Internet (FAI), juillet 2021.
5. Arushanyan (Y.). – *LCA of ICT solutions : environmental impacts and challenges of assessment*. – Thèse, KTH Royal Institute of Technology, 2013. Publisher : KTH Royal Institute of Technology.
6. Balin (P.), Bohas (A.), Charbuillet (C.) et Drezet (E.). – *Impacts écologiques des Technologies de l'Information et de la Communication : Les faces cachées de l'immatérialité*. – EDP Sciences, 2012. Publication Title : Impacts écologiques des Technologies de l'Information et de la Communication.
7. Belady (C.) et Malone (C.). – Metrics and an Infrastructure Model to Evaluate Data Center Efficiency. – janvier 2007.
8. Berthoud (F.) et Ficher (M.). – *Évaluation de l'empreinte carbone d'une visioconférence entre deux utilisateurs du service rendez-vous*. – report, CNRS - EcoInfo, mars 2022. Pages : 60.
9. Bihouix (P.) et Guillebon (B. d.). – *Quel futur pour les métaux ? : Raréfaction des métaux : un nouveau défi pour la société*. – EDP Sciences, 2010. Publication Title : Quel futur pour les métaux ?
10. Billstein (T.), Björklund (A.) et Rydberg (T.). – Life Cycle Assessment of Network Traffic : A Review of Challenges and Possible Solutions. *Sustainability*, vol. 13, n20, 2021, p. 11155. – Number : 20 Publisher : Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
11. Bonvoisin (J.), Lelah (A.), Mathieux (F.) et Brissaud (D.). – An integrated method for environmental assessment and ecodesign of ICT-based optimization services. *Journal of Cleaner Production*, vol. 68, avril 2014, pp. 144–154.
12. Bordage, F., de Montenay, L., Benqassem, S., Delmas-Orgelet, J., Domon, F., Prunel, D., Vatteau, C. et Lees Perasso, E. – *Le numérique en Europe : une approche des impacts environnementaux par l'analyse du cycle de vie (NumEU)*, décembre 2021.
13. Boustead (I.). – LCA — How it came about : — The beginning in the U.K. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 1, n3, septembre 1996, pp. 147–150.
14. Cherubini (F.), Bright (R. M.) et Strømman (A. H.). – Site-specific global warming potentials of biogenic CO₂ for bioenergy : contributions from carbon fluxes and albedo dynamics. *Environmental Research Letters*, vol. 7, n4, novembre 2012, p. 045902. – Publisher : IOP Publishing.
15. Christian Belady, Dan Azevedo, Michael Patterson, Jack Pouchet et Roger Tippley. – WP#32 - Carbon Usage Effectiveness (CUE) : A Green Grid Data Center Sustainability Metric | The Green Grid, décembre 2010.
16. Coroamă (V. C.), Bergmark (P.), Höjer (M.) et Malmödin (J.). – A Methodology for Assessing the Environmental Effects Induced by ICT Services : Part I : Single Services. – In *Proceedings of the 7th International Conference on ICT for Sustainability, ICT4S2020, ICT4S2020*, pp. 36–45, New York, NY, USA, juin 2020. Association for Computing Machinery.
17. ETSI Technical Committee Environmental Engineering. – *Environmental Engineering (EE); Methodology for environmental Life Cycle Assessment (LCA) of Information and Communication*

- Technology (ICT) goods, networks and services.* – ETSI, décembre 2014.
18. European Commission. – PEFCR Guidance document, - Guidance for the development of Product Environmental Footprint Category Rules, décembre 2017.
 19. European Commission. Joint Research Centre. Institute for Environment and Sustainability. – *International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook :specific guide for Life Cycle Inventory (LCI) data sets.* – LU, Publications Office, 2010.
 20. Feeney (L. M.). – An Energy Consumption Model for Performance Analysis of Routing Protocols for Mobile Ad Hoc Networks. *Mobile Networks and Applications*, vol. 6, n3, juin 2001, pp. 239–249.
 21. Ficher (M.), Berthoud (F.), Ligozat (A.-L.), Sigonneau (P.), Wisslé (M.) et Tebbani (B.). – Assessing the carbon footprint of the data transmission on a backbone network. – In *24th Conference on Innovation in Clouds, Internet and Networks*, Paris, France, mars 2021.
 22. Francis Vivat,. – Analyse de Cycle de Vie et Eco Conception. – Université de Strasbourg, novembre 2013.
 23. Françoise Berthoud. – Vers une informatique éco-responsable? – CNRS Paris, avril 2015.
 24. Freitag (C.), Berners-Lee (M.), Widdicks (K.), Knowles (B.), Blair (G. S.) et Friday (A.). – The real climate and transformative impact of ICT : A critique of estimates, trends, and regulations. *Patterns*, vol. 2, n9, septembre 2021, p. 100340.
 25. Gauthier Roussilhe. – *Que peut le numérique pour la transition écologique?* – Rapport technique, 2021.
 26. Geyer (R.), Stoms (D. M.), Lindner (J. P.), Davis (F. W.) et Wittstock (B.). – Coupling GIS and LCA for biodiversity assessments of land use. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 15, n5, juin 2010, pp. 454–467.
 27. Gradin (K. T.) et Björklund (A.). – The common understanding of simplification approaches in published LCA studies—a review and mapping. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 26, n1, janvier 2021, pp. 50–63.
 28. GreenConcept, ADEME, CCI Occitanie. – *Arkadin : réduction des impacts environnementaux d'un service numérique (opération Greenconcept) - Montpellier (34).* – Rapport technique, GreenConcept, septembre 2019.
 29. GreenConcept, ADEME, CCI Occitanie. – *Videomenthe : Réduction des impacts environnementaux d'un service numérique (opération Greenconcept) - Montpellier (34).* – Rapport technique, GreenConcept, septembre 2019.
 30. Grimal (L.), Di Loreto (I.) et Troussier (N.). – Explorer le paradigme informatique culturel de la soutenabilité pour re-concevoir les technologies interactives afin de soutenir la transition écologique. – In *17ème colloque national S-mart AIP-PRIMECA, LAVAL VIRTUAL WORLD*, France, mars 2021. Université Polytechnique Hauts-de-France [UPHF].
 31. Grimal (L.), Troussier (N.) et Di Loreto (I.). – Digital transformation as an opportunity for life cycle assessment. – In *16ème Colloque National S-mart*, Les Karellis, France, avril 2019.
 32. Guinée (J. B.), Cucurachi (S.), Henriksson (P. J.) et Heijungs (R.). – Digesting the alphabet soup of LCA. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 23, n7, juillet 2018, pp. 1507–1511.
 33. Gupta (U.), Kim (Y. G.), Lee (S.), Tse (J.), Lee (H.-H. S.), Wei (G.-Y.), Brooks (D.) et Wu (C.-J.). – Chasing Carbon : The Elusive Environmental Footprint of Computing. *arXiv :2011.02839 [cs]*, octobre 2020. – arXiv : 2011.02839.
 34. Horner (N. C.), Shehabi (A.) et Azevedo (I. L.). – Known unknowns : indirect energy effects of information and communication technology. *Environmental Research Letters*, vol. 11, n10, octobre 2016. – Institution : Lawrence Berkeley National Lab. (LBNL), Berkeley, CA (United States) Publisher : IOP Publishing.

35. Hunt (R. G.), Franklin (W. E.) et Hunt (R. G.). – LCA — How it came about : — Personal reflections on the origin and the development of LCA in the USA. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 1, n1, mars 1996, pp. 4–7.
36. Itten (R.), Hirschier (R.), Andrae (A.), Bieser (J.), Cabernard (L.), Falke (A.), Ferreboeuf (H.), Hilty (L.), Keller (R.), Lees-Perasso (E.), Preist (C.) et Stucki (M.). – Digital transformation—life cycle assessment of digital services, multifunctional devices and cloud computing. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 25, août 2020.
37. ITU. – ITU L1410 : Methodology for environmental life cycle assessments of information and communication technology goods, networks and services, mars 2012.
38. Lindahl (M.), Tingström (J.) et Jensen (C.). – A Comparison between the Environmental Effect Analysis (EEA) and the Life Cycle Assessment (LCA) methods - Based on Four Case Studies. *undefined*, 2000.
39. Malmödin (J.), Lundén (D.), Moberg (A.), Andersson (G.) et Nilsson (M.). – Life Cycle Assessment of ICT : Carbon Footprint and Operational Electricity Use from the Operator, National, and Subscriber Perspective in Sweden. *Journal of Industrial Ecology*, vol. 18, n6, décembre 2014, pp. 829–845.
40. Michael Patterson, Dan Azevedo, Christian Belady et Jack Pouchet. – WP#35 - Water Usage Effectiveness (WUE) : A Green Grid Data Center Sustainability Metric | The Green Grid, mars 2011.
41. Mutel (C. L.), Pfister (S.) et Hellweg (S.). – GIS-Based Regionalized Life Cycle Assessment : How Big Is Small Enough ? Methodology and Case Study of Electricity Generation. *Environmental Science & Technology*, vol. 46, n2, janvier 2012, pp. 1096–1103. – Publisher : American Chemical Society.
42. Neumayer (E.) et Dietz (S.). – Weak and strong sustainability in the SEEA : Concepts and measurement. *Ecological Economics*, vol. 61, février 2007, pp. 617–626.
43. Pauliuk (S.), Majeau-Bettez (G.), Mutel (C.), Steubing (B.) et Stadler (K.). – Lifting Industrial Ecology Modeling to a New Level of Quality and Transparency : A Call for More Transparent Publications and a Collaborative Open Source Software Framework. *Journal of Industrial Ecology*, vol. 19, juin 2015, pp. n/a–n/a.
44. Pohl (J.), Hilty (L. M.) et Finkbeiner (M.). – How LCA contributes to the environmental assessment of higher order effects of ICT application : A review of different approaches. *Journal of Cleaner Production*, vol. 219, mai 2019, pp. 698–712.
45. POTOČNIK (J.). – 2013/179/EU : Commission Recommendation of 9 April 2013 on the use of common methods to measure and communicate the life cycle environmental performance of products and organisations Text with EEA relevance, avril 2013. Code Number : 124 Code : OJ L Legislative Body : COM.
46. PricewaterhouseCoopers Advisory. – Study of the environmental impact of the Tezos blockchain - Life Cycle Assessment of the Tezos blockchain protocol, décembre 2021.
47. Roussilhe (G.). – Situer le numérique. 2020, p. 252.
48. Saner (D.), Vadenbo (C.), Steubing (B.) et Hellweg (S.). – Regionalized LCA-Based Optimization of Building Energy Supply : Method and Case Study for a Swiss Municipality. *Environmental Science & Technology*, vol. 48, n13, juillet 2014, pp. 7651–7659. – Publisher : American Chemical Society.
49. Schmitz (M. T.) et Al-Hashimi (B. M.). – Considering power variations of DVS processing elements for energy minimisation in distributed systems. – In *Proceedings of the 14th international symposium on Systems synthesis, ISSS '01, ISSS '01*, pp. 250–255, New York, NY, USA, septembre 2001. Association for Computing Machinery.
50. Tabata (T.) et Wang (T. Y.). – Life Cycle Assessment of CO2 Emissions of Online Music and

- Videos Streaming in Japan. *Applied Sciences*, vol. 11, n9, janvier 2021, p. 3992. – Number : 9
Publisher : Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
51. Verones (F.), Bartl (K.), Pfister (S.), Jiménez Vilchez (R.) et Hellweg (S.). – Modeling the Local Biodiversity Impacts of Agricultural Water Use : Case Study of a Wetland in the Coastal Arid Area of Peru. *Environmental Science & Technology*, vol. 46, n9, mai 2012, pp. 4966–4974. – Publisher : American Chemical Society.
 52. Weber (C.), Hendrickson (C.), Matthews (H.), Nagengast (A.), Nealer (R.) et Jaramillo (P.). – Life cycle comparison of traditional retail and e-commerce logistics for electronic products : A case study of buy.com. – pp. 1–6, juin 2009.
 53. Whitehead (B.), Andrews (D.), Maidment (G.) et Dunn (A.). – THE SCREENING LIFE CYCLE ASSESSMENT OF A DATA CENTRE. – p. 4, Lille, France, novembre 2012.
 54. Whitehead (B.), Tozer (R.), Shah (A.), Kosik (B.), Maidment (G.), Andrews (D.) et Bsc (A.). – The Environmental Burden of Data Centres – A Screening LCA Methodology. – mai 2012.