



Gauthier Roussilhe

Empreinte environnementale des systèmes numériques et gouvernance territoriale

Octobre 2021

Sciences Po Paris - École Urbaine,
Chaire "Villes et numérique"

SciencesPo

CHAIRE VILLES ET NUMÉRIQUE

Pour citer cet article : Gauthier Roussilhe, *Empreinte environnementale des systèmes numériques et gouvernance territoriale*, Working paper de la Chaire villes et numérique de Sciences Po, 2021



Cette œuvre est mise à disposition selon les termes de la Licence Creative Commons :

Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Partage dans les Mêmes Conditions 4.0 International

Sommaire

Résumé	4
Introduction	6
Obstacles et perspectives conceptuels	7
État des connaissances	9
Définition des conditions matérielles du cycle de vie	9
Méthodes et normes de mesure environnementale	10
État de l'art de l'empreinte environnementale globale	11
Regard sur les impacts positifs du secteur numérique	13
Inclusion du secteur numérique dans les politiques territoriales de transition écologique	15
Enjeux territoriaux	17
Puissance matérielle ou/et économie de services	17
Nouvelles contraintes climatiques et écosystémiques	18
Gouvernance locale des infrastructures numériques	19
La gestion électrique	19
La gestion de l'eau	22
L'aménagement de la fibre / réseaux mobiles	24
L'occupation des sols	25
Le développement industriel	26
Les politiques d'achat des collectivités	29
Économie circulaire et gestion des déchets	30
Les chantiers d'aujourd'hui et de demain	31
L'enjeu crucial de l'ouverture des données	31
Comment former ?	31
Démarches d'enquête locale dans un secteur global	32
Recommandations	33
Bibliographie	34
Crédits	35

Résumé

Le secteur numérique est aujourd'hui soit absent de la plupart des plans de transition énergétique et écologique, soit intégré marginalement pour sa capacité à optimiser la gestion urbaine. En l'occurrence, les questions d'aménagement du territoire liées à l'implantation de nombreuses infrastructures numériques sont peu régulées en France tandis qu'elles font l'objet de moratoires dans d'autres villes – comme les centres de données à Amsterdam, Francfort, et Singapour. Comme toutes les autres industries, **il semble important que les infrastructures numériques soient maîtrisées et/ou régulées afin de trouver leur place dans les contraintes et les ressources d'un territoire donné.** Cela est d'autant plus critique que la crise environnementale planétaire a le potentiel de réduire la marge de manœuvre liée aux émissions de gaz à effet de serre, de consommation d'énergie, de ressources, d'eau et d'occupation des sols.

En prenant le secteur numérique par le prisme environnemental il est essentiel de rappeler que nombre d'enjeux stratégiques peuvent être aussi intégrés à l'analyse finale : la cybersécurité, de l'accessibilité, du logiciel libre, de la souveraineté rentrent aussi dans l'équation. **Il peut être alors intéressant de se demander collectivement ce qu'il faut numériser et jusqu'où, et, ce qu'il ne faut pas majoritairement numériser, pour des raisons environnementales, sociales, de sécurité ou de souveraineté.** Est-ce que la numérisation du système de traitement et de suivi des patients doit être favorisée ou est-ce que la hausse de salaire du personnel sera plus efficace pour la qualité des soins et la qualité de vie du personnel ? Doit-on intégrer des objets connectés et numériser les services critiques dans l'hôpital si un budget conséquent n'a pas été alloué à la cybersécurité ? Est-ce que les soins sont impossibles à donner si le système numérique subit une panne ? Est-ce que la numérisation d'un hôpital dans le territoire donné permet de réduire son empreinte environnementale et l'amène dans le chemin de la transition ? Toutes ces questions font émerger des intérêts contradictoires. Elles doivent être traitées ensemble et surtout être contextualisées dans une

collectivité ou un territoire propre.

Loin de tout mythe de dématérialisation et de déterritorialisation, le secteur numérique doit certes être pensé au niveau terrestre (émissions de gaz à effet de serre, chaînes de production et d'approvisionnement) **mais aussi au niveau territorial** (empreinte locale, ressources nécessaires, emploi, etc.) **afin de faire émerger des possibilités de gouvernance environnementale du secteur numérique.**

Empreinte environnementale des systèmes numériques et gouvernance territoriale

Introduction

Ce qu'on appelle aujourd'hui le « numérique » convoque en réalité une pluralité de projets, d'infrastructures, de modèles économiques, de confrontations politiques et commerciales, de zones d'influence culturelle et d'offres de service. Le projet d'un GAFAM¹ a finalement peu à voir avec le projet du réseau informatique de recherche RENATER ou le projet de Wikipédia. Peut-on alors concrètement les associer et les manipuler sous le même terme ? **Cette pluralité nous amènera tout au long de ce rapport à décrire « des numériques », c'est-à-dire des projets, des infrastructures et des services, spécifiques à une pluralité de contextes sociaux, culturels, écologiques, économiques, industriels et politiques.** Ainsi, ces « numériques » ne peuvent pas être étudiés en isolation, mais doivent être replacés et décrits au sein des environnements dans lesquels les technologies se déploient. Cet exercice de description est d'autant plus nécessaire alors que s'accroît la crise écologique. Cette nouvelle donne modifie durablement les conditions matérielles et les conditions de vie sur lesquelles a reposé le secteur numérique et son expression dans les territoires, ainsi que les communautés et les secteurs eux-mêmes affectés par la transformation globale en cours.

Le présent rapport tente de saisir ces numériques par leur composante environnementale, c'est-à-dire les conditions matérielles (flux de matières et d'énergie) et environnementales (stabilité écologique, écosystèmes exploitables, pollutions, transitions écologique et énergétique) nécessaires à la production, à l'usage et au maintien de systèmes numériques inscrits dans les contraintes d'un territoire. De la mesure de l'empreinte environnementale de ces systèmes à leur mise en perspective dans une multitude d'échelles territoriales (État, industrie, ville, périphérie, village), ce rapport brossera donc une première image des connaissances actuelles et des perspectives de recherche pour mieux comprendre l'impact environnemental des systèmes numériques et leur influence sur la gouvernance territoriale.

¹ GAFAM : Google, Amazon, Facebook, Apple, Microsoft

Obstacles et perspectives conceptuels

Les systèmes numériques, pensés comme secteur dans la taxonomie de l'OCDE², ont une histoire particulière par rapport aux autres secteurs et infrastructures globales : **le secteur numérique a sûrement été le seul où l'infrastructure a été décrite comme « immatérielle » ou « dématérialisée »**. Nathan Ensmenger résume en partie la généalogie des idées qui, de Nicholas Negroponte à Diane Coyle, tissent l'image d'un monde dans « lequel les ressources matérielles seraient largement inutiles »³, où « le matériel (atomes) serait remplacé par le virtuel (*bits*) »⁴, ou encore présentent l'image d'une économie « sans poids » (*weightless*)⁵. **Ces concepts ont été largement facilités par le fait que les infrastructures matérielles des technologies numériques sont discrètes, parfois camouflées ou installées plus loin des centres urbains, et tentent de s'intégrer dans les coquilles laissées par d'autres infrastructures.**

Néanmoins, les services numérisés ont une matérialité propre, ce qui peut conduire à une seconde matérialisation si les services physiques et numériques se superposent. D'un point de vue environnemental, la question de la dématérialisation revient ainsi à se demander si la numérisation permet de réduire l'intensité relative en matière et en énergie d'un processus donné et donc son efficacité⁶. **Plusieurs études récentes remettent en question la perspective de dématérialisation liée à la numérisation.** Magee et Devezas concluent que : « [...] l'extension de la théorie [de la dématérialisation] et l'examen empirique indiquent qu'il n'y a pas de dématérialisation, même pour les cas de technologie de l'information avec un progrès technique rapide. Ainsi,

une politique totalement passive qui s'appuie sur un changement technologique sans entrave n'est pas soutenue par nos résultats⁷. Malgré cela, la théorie de la dématérialisation est encore largement poussée dans l'imaginaire collectif par un terme comme cloud (hébergement sur un serveur distant) et par la perpétuation du camouflage et de la discrétion des infrastructures.

L'idée de dématérialisation s'est appuyée sur un second élément de discours, **que Clément Marquet nomme la thèse « antigéographique », c'est-à-dire, l'idée d'une abolition de l'espace et de la dissolution des villes par les technologies numériques**⁸. Cette thèse aurait été appuyée par un certain nombre de penseurs comme Marshall McLuhan, Alvin Toffler, Paul Virilio, Nicolas Negroponte, Bill Gates ou encore Manuel Castells⁹. Dans le sens de cette thèse, Frances Cairncross propose « la mort de la distance » par saper « l'importance des concentrations géographiques dans les villes » dans un monde où les technologies de l'information et des communications (TIC) révolutionnent les relations sociales et professionnelles¹⁰. **Cette perspective d'une dissolution de l'espace pourrait être décrite comme un mouvement de déterritorialisation conjoint à celui de la dématérialisation : sans matérialité à décrire, il n'y a plus de territoire à décrire.** Cette idée pourrait amener à penser l'infrastructure numérique et ses services comme un drap qui se dépose et recouvre uniformément l'ensemble du globe. Toutefois, comme nous le verrons plus tard, cet imaginaire est loin d'être vrai : l'installation et la maintenance de l'infrastructure dépend bien évidemment des spécificités

² La définition du secteur numérique réunit généralement le secteur des Technologies de l'Information et des Communications (TIC) et de l'E&M (Entertainment & Media)

³ Nathan Ensmenger, « The Environmental History of Computing », *Technology and Culture* 59 n° 4, 2018, p. 9, consulté le 4 octobre 2021

⁴ Ibid.,

⁵ Ibid.,

⁶ Oliviero Bernardini et Riccardo Galli, « Dematerialization: Long-term trends in the intensity of use of materials and energy », *Futures* 59 n° 4, 1993, pp. 446-447, consulté le 4 octobre 2021

⁷ Christopher L. Magee et Tessaleno C. Devezas, « A simple extension of dematerialization theory: Incorporation of technical progress and the rebound effect », *Technological Forecasting and Social Change* 117, 2017, p. 196, consulté le 4 octobre 2021

⁸ Clément Marquet, « Binaire béton : Quand les infrastructures numériques aménagent la ville », Thèse de sociologie, Université Paris-Saclay, 2019, p. 21, consulté le 4 octobre 2021

⁹ Emmanuel Éveno et Gilles Puel, « Villes et Nouvelle Économie », *Mappemonde* 70, 2003, p. 1, consulté le 4 octobre 2021

¹⁰ Stephen Graham, « Beyond the 'Dazzling Light': From Dreams of Transcendence to the 'Remediation' of Urban Life: A Research Manifesto », *New Media & Society* 6, n°1, 2004, pp. 16-17

géographiques et environnementales des territoires d'implantation, de même, que l'accès et l'usage des services est largement modulé par ces spécificités.

Finalement, **saisir les systèmes numériques se relève être un exercice complexe tant ils existent simultanément sous deux états : concentrés et dilués.** On observe d'un côté une concentration importante des capitaux, de la captation de valeur, des moyens de production, des infrastructures, et de l'autre côté, la numérisation qui transforme de façon diffuse l'ensemble des secteurs d'activités : industrie, politiques publiques, logistique, finance, divertissement, etc. À tel point que l'on peut s'interroger si une voiture appartient au secteur des transports ou au secteur du numérique lorsque 50% de son prix d'acquisition est lié à l'électronique embarquée et aux équipements numériques¹¹. Ainsi, l'estimation de l'empreinte environnementale du secteur numérique pose un problème de périmètre : dans un secteur qui n'est pas également distribué mais qui touche à la plupart des activités sur Terre, où s'arrêterait de compter ?

Face à cette question centrale, nous mobiliserons la notion de « numériques situés »¹³ que nous proposons avec Nicolas Nova, pour définir notre cadre d'analyse. **Les « numériques situés » tentent de saisir conjointement la matérialité, les territoires et les échelles terrestres dans lesquelles les infrastructures du secteur numérique et leurs impacts sociaux et environnementaux sont entremêlés et interagissent.** Au-delà de la matérialisation et de la territorialisation déjà définies plus haut, l'ajout du cadre de la terrestrialisation rappelle l'impossibilité pratique d'étudier le secteur numérique sans ses chaînes d'extraction et d'approvisionnement mondialisées et sans ses impacts environnementaux affectant des cycles planétaires et de larges écosystèmes terrestres. De même, la notion de « numériques situés » implique que les territoires et les changements terrestres ne sont pas des surfaces inertes dans lesquels s'accumulent les impacts jusqu'à rupture, mais bien des entités agissantes sur la façon dont le secteur numérique matérialise et territorialise ses infrastructures, ses flux et ses services.

¹¹ Deloitte Touche Tohmatsu Limited, « Semiconductors – the Next Wave Opportunities and winning strategies for semiconductor companies », *Deloitte*, 2019, pp. 14-15, consulté le 4 octobre 2021

¹² Nicolas Nova et Gauthier Roussilhe, « Du low-tech numérique aux numériques situés », *Sciences du Design 11*, 2020, pp. 99-100, consulté le 4 octobre 2021

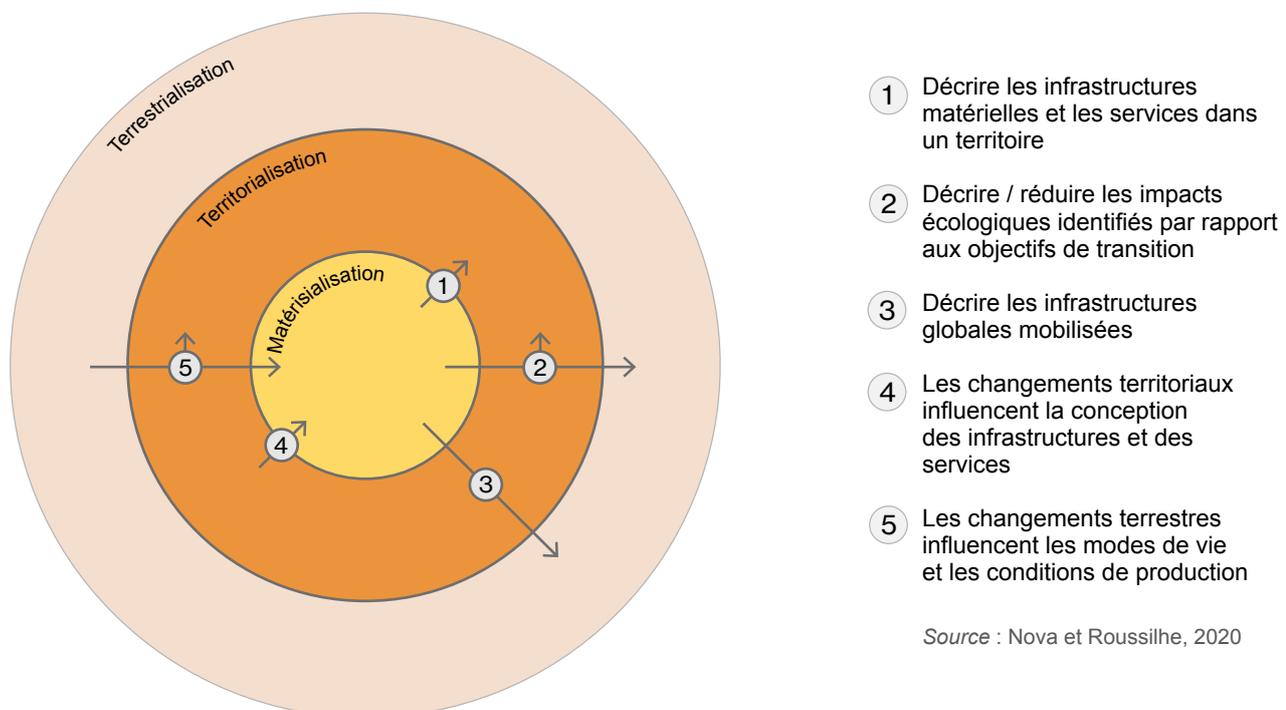


Fig. 1 – Cadre d'analyse des « numériques situés »

État des connaissances

La recherche autour de l’empreinte environnementale du secteur numérique est relativement récente. **Les premières publications abordant ce sujet datent du début des années 2000 et les publications s’accroissent à partir des années 2010.** Aujourd’hui, la recherche sur ce sujet est très dense, d’autant que d’autres disciplines traitent de sujets parfois proches de l’empreinte environnementale du secteur numérique. Les sciences informatiques et l’ingénierie s’intéressent depuis très longtemps à l’efficacité énergétique des systèmes numériques, les Digital Media Studies ainsi que les Science and Technology Studies ont largement abordé la dimension matérielle des dispositifs numériques. Toutefois l’évaluation environnementale des systèmes numériques est un champ à part entière que nous allons tenter de résumer ici.

Définition des conditions matérielles du cycle de vie

Les conditions matérielles définissent l’ensemble des flux matériels (matières premières, énergie, milieux disponibles à l’exploitation), des capitaux, et des conditions environnementales permettant l’extraction, la transformation, la fabrication et l’usage de produits, services et systèmes numériques. **Historiquement, le secteur numérique s’est développé lors d’une période de forte croissance de tous les flux matériels et des flux logistiques associés.** De même, des capitaux colossaux ont été mobilisés pour financer la recherche industrielle et ses applications publiques et privées.

Deux approches sont privilégiées pour analyser ces conditions matérielles du numérique. D’un côté, on peut cartographier les chaînes de production allant du secteur minier à l’assemblage jusqu’à l’usage et la fin de vie d’un produit. De l’autre, on peut aussi reprendre la typologie par tiers, technique utilisée dans les estimations d’empreinte environnementale ou d’analyses de cycle de vie d’un système numérique. Ces vues sont nécessaires pour matérialiser les chaînes de production et d’approvisionnement complexes du secteur, et, ensuite, les faire rentrer dans un cadre méthodologique d’analyse environnementale. Cette vision permettra de mieux comprendre les explications à venir.

Mesurer l'empreinte environnementale d'un produit est un exercice complexe, qui nécessite une grande visibilité sur ses chaînes d'approvisionnement, sa production et sur sa fin de vie. **La notion d'empreinte environnementale souligne l'importance d'avoir plusieurs facteurs d'impact.** La mesure de l'empreinte d'un produit / service / système numérique varie entre une approche monocritère (comme le bilan carbone) et multicritère (comme l'analyse de cycle de vie) en fonction de la mission, du budget disponible et des données environnementales à disposition.

La méthode la plus complète pour effectuer une mesure multicritère est l'Analyse de Cycle de Vie (ACV). **Les normes ISO 14040¹³ (Analyse du cycle de vie — Principes et cadre) et 14044¹⁴ (Analyse du cycle de vie — Exigences et lignes directrices) fixent les règles internationales de l'ACV pour tous les secteurs et les praticiens.** Il existe aussi des normes internationales spécifiques au secteur des technologies de l'information de la communication (TIC) comme la norme ETSI ES 203 199 issue d'un travail conjoint de l'Union internationale des télécommunications (UIT ou ITU en anglais) et de constructeurs comme Alcatel, Ericsson, Huawei et Nokia. La norme ETSI est plus précise que les normes ISO mais elle demande une granularité et une précision de données qui sont rarement atteignables pour les professionnels de l'ACV¹⁵. Ainsi, ces derniers tendent à privilégier encore les ISO à l'ETSI par manque de données disponibles.

En effet, la difficulté principale pour faire une ACV de produit, de service ou de système numérique est l'absence de données primaires et vérifiées. **Les chaînes d'approvisionnement du secteur numérique sont d'une grande complexité. Même les entreprises les plus investies ont beaucoup de difficulté à produire des données¹⁶.** En outre, la plupart des grandes entreprises du secteur protège

leurs données pour offrir le moins d'informations possibles sur leur fonctionnement à leurs concurrents.

La qualité des données peut être classée en trois catégories, du plus qualitatif au moins qualitatif : les données primaires, issues d'une mesure directe de l'action audité dans l'ACV ; les données secondaires, issues des résultats d'autres ACV ; et les modélisations, déterminant un modèle d'impact depuis des données globales non contextualisées. **Aujourd'hui la plupart des études utilisent des données secondaires ou des modélisations, faute d'avoir un accès privilégié à des partenaires industriels.**

¹³ [ISO 14040:2006](#), Management environnemental — Analyse du cycle de vie — Principes et cadre

¹⁴ [ISO 14044:2006](#), Management environnemental — Analyse du cycle de vie — Exigences et lignes directrices

¹⁵ Témoignages issus d'échanges personnels avec des professionnels français et européens.

¹⁶ Par exemple, Apple publie régulièrement une liste de plus de 200 fournisseurs, de même pour Fairphone qui propose en plus un découpage entre assembleur, fabricant de composants et fondeurs de métaux (smelters).

État de l'art de l'empreinte environnementale globale du secteur numérique

L'estimation globale de l'empreinte environnementale du secteur numérique a aujourd'hui principalement été effectuée par trois équipes de chercheurs : Andrae et Edler (2015) + Andrae (2020), Belkhir et Elmeligi (2018), Malmodin et Lundén (2018). Toutefois, les périmètres d'étude, les données de référence et leur qualité, varient d'une étude à l'autre, ce qui rend difficile la compréhension et la comparaison.

En 2015, Andrae et Edler (A&E) ont fourni une première estimation globale avec les données accessibles à l'époque, qu'ils ont publié, ainsi que leur modèle de calcul, avec leur article¹⁷. **La mise à disposition de ces données a participé à la popularité de cette étude auprès de nombreux professionnels.** Par exemple, le

Shift Project, en 2018, s'est basé dessus pour son rapport « Lean ICT »¹⁸. Toutefois, la communauté scientifique considère que l'impact de la partie « Réseaux » d'A&E est très largement surestimé, ainsi que, dans une moindre proportion, la partie « Centres de données ». Andrae a publié une réévaluation en 2020 qui revoit ses estimations à la baisse¹⁹. Leur estimation globale concerne la consommation d'électricité, d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre (GES) associées.

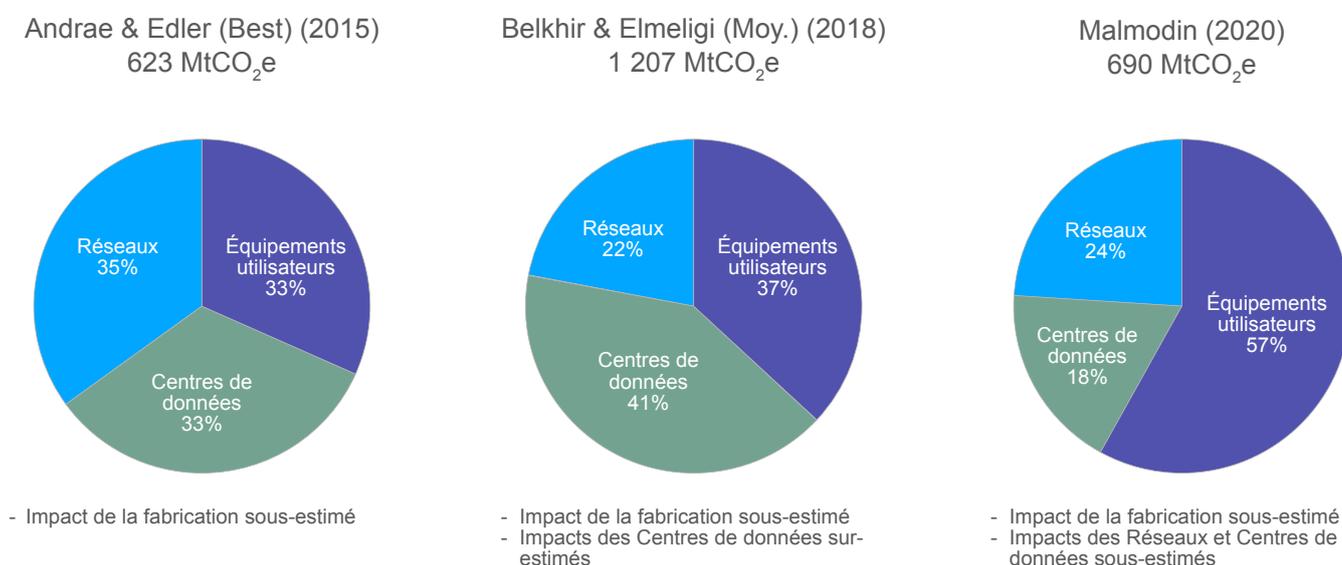
En 2018, Belkhir et Elmeligi (B&E) proposent une estimation alternative²⁰. Ils ajoutent également une modélisation de l'évolution de l'empreinte jusqu'en 2040, bien que cela ne soit pas recommandé dans ce

¹⁷ Anders S. G. Andrae et Tomas Edler, « On Global Electricity Usage of Communication Technology: Trends to 2030 », *Challenges* n° 6, 2020, pp. 117-157

²⁰ Lofti Belkhir et Ahmed Elmeligi, « Assessing ICT global emissions footprint: Trends to 2040 & recommendations », *Journal of Cleaner Production* n° 177, 2018, pp. 448-463.

¹⁸ The Shift Project « Lean ICT : pour une sobriété numérique », octobre 2018.

¹⁹ Anders S. G. Andrae, « New perspectives on internet electricity use in 2030 », *Eng. Appl. Sci. Lett.* n° 3, 2020, pp. 19-31.



Note : L'impact des TV n'est pas inclus dans ces estimations. Le meilleur scénario d'Andrae & Edler est retenu car il semble le plus plausible d'après les auteurs. La part des équipements utilisateurs est plus importante chez Malmodin car la part estimée des Réseaux et Centres de données est la plus basse parmi toutes les études présentées.

Source : d'après Freitag et al., « The climate impact of ICT: A review of estimates, trends and regulations »

Fig 2 – Récapitulatif des estimations de l'empreinte carbone du numérique en 2020 (TV exclus) d'après Freitag et al

champ de recherche. **En effet, le rythme rapide d'évolution technologique rend peu fiable des projections d'empreinte à plus de 10 ans dans le secteur numérique.** En outre, l'étude de B&E tend à surestimer la partie « Centres de données », tout en offrant une perspective plus précise sur l'évolution de l'empreinte des smartphones. Comme pour A&E, leur estimation globale concerne la consommation d'électricité, d'énergie et les émissions de GES associées.

En 2018, Malmodin & Lundén (M&L) publient la dernière estimation globale en date²¹. Travaillant chez Ericsson, ils ont accès à des données plus qualitatives (en partie primaires) fournies par d'autres équipementiers et géants du secteur. **Leur étude, qui semble être d'une grande qualité, est largement citée. Toutefois, les données sur lesquelles ils se basent, leur ont été fournies sous clause de confidentialité et n'ont pas été publiées. De ce fait, ces données de référence ne sont pas visibles, leur représentativité ne peut pas être étudiée et les résultats ne sont donc pas répliquables.** M&L donnent aussi leur estimation en consommation d'électricité, d'énergie et d'émissions de GES. À l'inverse d'A&E et de B&E qui envisagent une hausse de l'empreinte, Malmodin & Lundén estiment que celle-ci va

baisser significativement dans les années à venir grâce à l'amélioration de l'efficacité et la substitution d'équipements (un smartphone remplace un grand nombre d'équipements).

Dans le paysage français, GreenIT, une des communautés des acteurs du numérique responsable, a proposé une estimation globale basée sur des données d'ACV établies pour des clients privés²². Comme pour M&L, les données de référence sont issues d'ACV réalisées par GreenIT mais qui ne sont pas publiques. La qualité et la représentativité des données utilisées ne peuvent pas être évaluées là-aussi. Ce rapport de GreenIT n'est pas une publication scientifique et n'a pas été soumis à une revue aveugle par les pairs. Toutefois, l'analyse de **GreenIT propose une estimation sur les quatre facteurs d'impact d'une ACV dite « screening » : émissions de GES, consommation d'énergie primaire, consommation de ressources, consommation d'eau.** Les résultats de GreenIT sont plus élevés que les estimations précédentes et vont au-delà de la focale énergie et GES. À partir de cette méthodologie, GreenIT a aussi proposé, en 2020, une estimation de l'empreinte environnementale du numérique en France²³.

²¹ Jens Malmodin et Dag Lundén, « The Energy and Carbon Footprint of the Global ICT and E&M Sectors 2010-2015 », Sustainability 10, n° 9, 2018, p. 3027.

²² Collectif GreenIT, « Empreinte environnementale du numérique mondial », GreenIT, septembre 2019.

²³ Collectif GreenIT, « iNum : Impacts environnementaux du numérique en France », GreenIT, 31 janvier 2020.

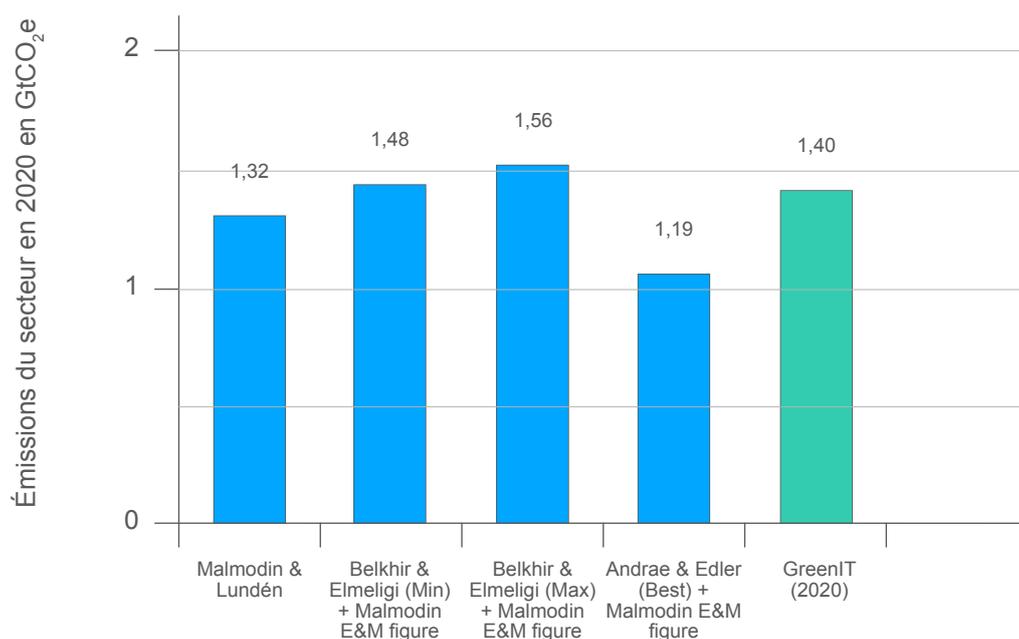


Fig 3 – Estimations de l'empreinte carbone du numérique en 2020 ajustées sur le même périmètre (TV et électronique inclus) d'après Freitag et al

Source : Freitag et al., « The real climate and transformative impact of ICT: A critique of estimates, trends, and regulations »

Note : GreenIT's estimate is based on 2019 emissions

Les graphiques ci-dessus résument l'ensemble des estimations présentées ci-dessus. De même, une normalisation de ces résultats avec des périmètres similaires, issue du travail de Freitag et al²⁴, est reprise ici afin de clarifier l'état des connaissances actuelles.

Ainsi, le niveau d'incertitude ou d'opacité des données de référence rend difficile le travail d'estimation, et davantage encore, l'exercice de projection. Cependant, **un consensus existe pour affirmer que la consommation d'énergie et de ressources du secteur des TIC (au sens large) va augmenter dans les prochaines années.** Les

Regard sur les impacts positifs du secteur numérique pour la transition écologique

Le secteur numérique et ses solutions appliquées aux territoires urbains, comme la smart city, ont souvent été associés une politique de transition environnementale. Cette idée est stimulée par les gains d'efficacité et l'optimisation permise par la numérisation de certains systèmes (gestion du trafic, gestion des ressources et des stocks). Numérique et environnement sont ainsi généralement associés (de façon indéterminée) dans les plans de financement et les plans d'aménagement. Ainsi, **l'estimation des impacts environnementaux directs du numérique soulèvent parallèlement la question des impacts positifs possibles de la numérisation pour la transition écologique.** Quel est l'état de nos connaissances vis-à-vis de cette question ? Quelles sont les affirmations, méthodologies et hypothèses qui sont aujourd'hui mobilisées ?

Dans de nombreux cas, la numérisation d'un usage et d'un système apporte de nombreux bénéfices et une réduction des émissions de gaz à effet de serre liées à cet usage ou système. Toutefois, **l'impact positif de la numérisation sur les émissions de GES dans un contexte donné n'est pas forcément répliquable, ou les gains ne sont pas du même ordre.** Par exemple, Versteijlen et al²⁵ ont étudié spécifiquement l'impact de l'enseignement supérieur à distance aux Pays-Bas. Ils concluent qu'une réduction est possible, mais, dans

émissions de GES pourraient descendre selon certains (M&L) grâce à un fort investissement dans les énergies renouvelables (EnR) dans la consommation d'électricité des systèmes numériques. D'autres estiment (A&E, B&E, GreenIT) que l'augmentation de la consommation d'électricité et l'augmentation de la production d'appareils contrebalancera l'inclusion des EnR dans la consommation d'électricité. Ainsi, **il est aujourd'hui plus sûr de prendre la fourchette des estimations concurrentes plutôt que d'annoncer une valeur unique, soit de 2,1 à 3,9% des émissions globales.**

une moindre mesure, car les étudiants aux Pays-Bas ont accès aux transports publics gratuitement. L'impact ne serait pas le même aux États-Unis ou en Australie où les trajets sont le plus souvent faits en voiture.

À l'inverse de la communication provenant des entreprises et industriels du numérique, des cas concrets d'application comme la smart city ne sont pas toujours positifs. Ipsen et al ont couplé les méthodes d'analyse de cycle de vie aux méthodes d'analyse de métabolisme urbain pour estimer la différence entre l'empreinte environnementale de Copenhague et de sa version *smart*²⁶. « Smart Copenhagen » était un scénario incluant des toitures végétalisées, des fenêtres « intelligentes », une collecte de déchets « intelligente », une collecte des déchets pneumatiques, une récupération des eaux grises, des compteurs d'eau intelligents et un réseau d'électricité intelligent (*smart grid*). **Le résultat de cette comparaison indique de la version « smart » de Copenhague augmente les impacts environnementaux avec notamment un transfert des impacts directs vers les impacts d'extraction et de fabrication, généralement situés hors des centres urbains.**

²⁴ Charlotte Freitag et al., « The real climate and transformative impact of ICT: A critique of estimates, trends, and regulations », *Patterns* 2, n° 9, 2021.

²⁵ Marieke Versteijlen et al., « Pros and cons of online education as a measure to reduce carbon emissions in higher education in the Netherlands », *Current Opinion in Environmental Sustainability* 28, 2017, pp. 80-89.

²⁶ Kikki Lambrecht Ipsen, « Environmental assessment of Smart City Solutions using a coupled urban metabolism—life cycle impact assessment approach », *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2018.

S'il n'existe pas de publications scientifiques sur l'estimation globale des impacts environnementaux positifs du secteur numérique, plusieurs publications se focalisent sur un usage spécifique ou un cas particulier (télé-médecine, navigation routière, télétravail, etc.). En 2018, lors d'une analyse systématique de la littérature, Bieser et Hilty ont identifié 54 études issues d'articles de recherche, d'actes de conférences et de littérature grise²⁷. 31 de ces études se concentrent sur un seul type d'usage avec des méthodes type Analyse de Cycle de Vie (ACV) ou bilan carbone, 21 sont des études avec de multiples cas d'usage et utilisent une approche appelée "ICTem" (*ICT enablement method*). Toutefois, **plus de la moitié de ces 21 études sont issues de rapports d'entreprises du secteur. Elles sont donc à interpréter avec précaution.**

La littérature grise est la seule qui fournit des estimations globales des impacts positifs. En l'occurrence, deux organisations professionnelles ont produit des rapports dans ce sens : les rapports SMART et SMARTer de GeSI (Global e-Sustainability Initiative) et le rapport « The Enablement Effect » de GSMA. Des entreprises comme AT&T ont aussi produit des rapports mais qui ne concernent que leur secteur d'activité. Les rapports de GeSI estiment que la numérisation permettrait de réduire les émissions mondiales de gaz à effet de serre jusqu'à 20% d'ici 2030²⁸. **Cette affirmation repose sur des hypothèses fortes comme le fait que la numérisation réduirait de 80% les voyages d'affaires en avion et en voiture d'ici 2030, une réduction de 30% des trajets vers les lieux d'éducation, une réduction de 30% de la consommation d'énergie de l'agriculture, une réduction de 15% de la production de voitures ou encore une réduction de 20% de la production d'énergie.** Le rapport de GSMA, plutôt orienté sur les télécommunications, estime que 1 tonne d'éqCO2 permet d'éviter 10 tonnes dans les autres secteurs²⁹.

²⁷ Jan Bieser et Lorenz Hilty, « Assessing Indirect Environmental Effects of Information and Communication Technology (ICT): A Systematic Literature Review », *Sustainability* 10, 2018, pp. 1-19.

²⁸ GeSI et Accenture Strategy, « SMARTer2030 – ICT Solutions for 21st Century Challenges », GeSI, 2015.

²⁹ Carbon Trust, « The Enablement Effect – The impact of mobile communications technologies on carbon emission reductions », GSMA, 2019.

Une autre partie de la littérature scientifique s'intéresse précisément aux méthodes d'estimation des impacts positifs de la numérisation. Sans proposer de méthode parfaite, la plupart des articles de recherche pointent les défauts méthodologiques des estimations globales et tentent de formuler de nouvelles méthodes de modélisation. Jens Malmmodin et Vlad Coroama ont notamment critiqué plusieurs fois l'extrapolation d'études de cas pour arriver à une estimation globale³⁰. Ils ont proposé avec Pernilla Bergmark, Mattias Höjer et Craig Donovan une façon de modéliser les effets induits par la numérisation³¹. **Toutefois, on peut estimer qu'il n'existe pas aujourd'hui de méthode stabilisée pour modéliser et estimer les impacts positifs du numérique pour la transition écologique.**

³⁰ Jens Malmmodin and Vlad Coroama, « Assessing ICT's enabling effect through case study extrapolation – the example of smart metering », *2016 Electronics Goes Green 2016+ (EGG)*, 2016, p. 1.

³¹ Vlad Coroama et al., « A Methodology for Assessing the Environmental Effects Induced by ICT Services – Part I: Single Services », *7th International Conference on ICT for Sustainability (ICT4S2020)*, 2020.

Inclusion du secteur numérique dans les politiques territoriales de transition écologique

Si des évolutions législatives récentes prennent en compte les enjeux environnementaux du numérique, force est de constater que les dispositifs territoriaux pour la transition écologique n'incluent aujourd'hui pas le secteur du numérique.

Les politiques nationales et territoriales pour la transition écologique et énergétiques représentent une nébuleuse complexe, où se mélangent État, agences publiques, régions et collectivités. Le réseau des acteurs pour la transition énergétique (CLER) a créé une infographie reprenant et classant les différents programmes disponibles aujourd'hui pour les territoires français³².

À partir de ce schéma, nous avons souhaité analyser si les dispositifs suivants incluaient des questionnements relatifs au secteur du numérique : Cit'ergie, Economie Circulaire, Contrat de Relance de Transition Écologique (CRTE) et le Plan Climat-Air-Énergie Territorial (PCAET).

Les programmes Cit'ergie et Économie Circulaire (Eci) ne mentionnent pas directement le secteur numérique. Cependant, par effet de bord, certaines actions dans ces programmes pourraient concerner la filière numérique.

³² CLER, « Porter un projet de territoire en transition – Articuler les démarches méthodologiques », mai 2021.

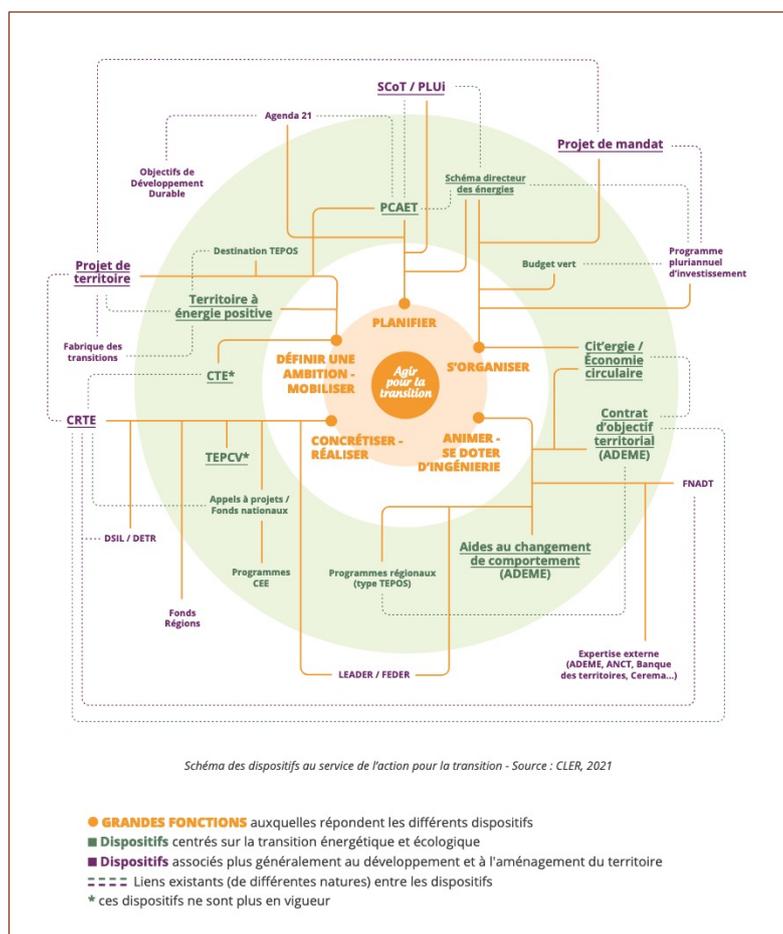


Fig 4 – Schéma des dispositifs au service de l'action pour la transition

Des réflexions sont aussi en cours pour créer des actions spécifiques au « Numérique territorial responsable », touchant autant à l'exemplarité de la collectivité qu'à la maîtrise sur le territoire du développement de l'infrastructure.

Dans les lignes directrices du Contrat de Relance de Transition Écologique (CRTE), le secteur numérique ne fait pas l'objet d'une section particulière et est très peu mentionné³³.

Finalement, dans les Plans Climat-Air-Énergie Territorial (PCAET), le secteur numérique n'est pas inclus dans les « focus sectoriels » et ne fait pas l'objet de recommandations ou d'actions précises³⁴.

Il apparaît dans cette première analyse des politiques de transition écologique et énergétique que le secteur numérique n'est pas intégré comme secteur ou filière à part entière, mais plutôt comme un facteur marginal sur l'évolution des autres secteurs et leurs usages. Ainsi le développement de ce secteur n'est pas encadré par les dispositifs territoriaux mentionnés plus haut.

L'évolution législative au niveau national laisse espérer que l'enjeu de gouvernance du secteur numérique au niveau territorial soit mis en évidence. Toutefois, très peu de personnels dans les administrations ou dans les collectivités sont aujourd'hui formés pour produire une stratégie numérique responsable, et les programmes territoriaux ne fournissent pas encore de réponse à ce sujet. Aujourd'hui, **la définition même de ce qu'est une « stratégie numérique responsable » pour une collectivité reste à produire.**

³³ Ministère de la Transition Écologique, « Lignes directrices pour la mise en œuvre sur les territoires des mesures de relance portées par la Ministère de la Transition Écologique », décembre 2020.

³⁴ ADEME, « PCAET, comprendre, construire et mettre en œuvre », novembre 2016.

Prise en compte possible du secteur numérique dans les plans territoriaux de transition écologique

Cit'ergie

- 5.1.3 – Former et mobiliser les élus et les services sur les thématiques Climat Air Énergie
- 5.2.2 – Être exemplaire en matière d'écoresponsabilité de la commande publique
- 6.2.4 – Accompagner les acteurs du secteur tertiaire pour la rénovation et la construction durable de leurs locaux
- 6.3.1 – Favoriser les activités économiques durables
- 6.5.1 – Mobiliser la société civile en développant la concertation
- 6.5.2 – Inciter les citoyens et les relais d'opinions à une consommation responsable, limiter l'emprise de la publicité
- 6.5.3 – Développer des actions d'éducation et de sensibilisation dans les établissements scolaires et centres de petite enfance

Économie Circulaire

- 3.3 – Encouragement à la sobriété et à la consommation responsable
- 3.6 – Économie de fonctionnalité pour accompagner la demande en sobriété
- 5 – Actions de consommation responsable tournées vers les différents publics, si il s'agit de promouvoir la sobriété

CRTE

- 1.3.4 – Transition écologique et rénovation énergétique des TPE-PME - Soutien en aide d'Etat, sous forme de forfait pour engager ou accélérer une démarche d'écoconception (« possibilité de focus sur les secteurs à enjeu comme le numérique »)
- 2.1.1 – Densification et renouvellement urbain - Fonds de recyclage des friches (développement d'outils numériques de suivi et d'appui)
- 8.3 – Soutien à la recherche et au développement dans la filière nucléaire (lever un certain nombre de verrous technologiques : jumeau numérique, fabrication additive, usines connectées, impression 3D)

Enjeux territoriaux

Au-delà des dispositifs territoriaux de transition, des enjeux macroscopiques du secteur se poseront dans tous les cas au secteur numérique et modifieront son déploiement et son usage dans de nombreux territoires. L'absence de souveraineté sur la couche logicielle et matérielle peut couper court à toute revendication environnementale. Ainsi, l'évolution des équipements et services numériques peut devenir subie. De même, comme nous allons le voir la crise environnementale fait augmenter les risques sur l'infrastructure. Alors, quels sont les enjeux macroscopiques qui redéfinissent notre perception du risque et de maîtrise de l'infrastructure ?

Puissance matérielle ou/et économie de services

Depuis plusieurs décennies, le modèle économique du secteur numérique basé sur les services (économie de la connaissance, du partage, etc.) a largement été promu par l'écosystème entrepreneurial occidental. Face aux enjeux environnementaux cités ci-dessus, **on peut légitimement se demander si la maîtrise des ressources minières et des capacités de production ne doit pas devenir un élément central de toute stratégie de développement du secteur numérique.** En effet, alors que les demandes en métaux et en énergie du secteur augmentent rapidement, il paraît complexe de poursuivre la stratégie actuelle de développement du secteur sans s'assurer de la continuité des flux matériels nécessaires et de leur compatibilité avec les objectifs de transition écologique.

Le gouvernement chinois semble avoir pris en compte ces contraintes dans la régulation du secteur de l'économie numérique. Leur stratégie de numérisation priorise la sécurisation des réserves minières (terres rares, cuivre, etc.) et des capacités de production de composants et appareils essentiels au secteur numérique. Cela est permis par la richesse géologique des sols sur le territoire chinois quant aux métaux nécessaires au secteur numérique et à la transition énergétique. Pour citer l'analyste financière Rui Ma : « Les priorités du gouvernement penchent plutôt vers la

fabrication plutôt que la financiarisation. Bien sûr, la Chine sait que la finance peut créer plus de richesse, plus rapidement. Mais il considère cela comme étant de qualité inférieure, et il a donc décidé de ne pas succomber à la « valeur » de marché facile acquise au secteur des services »³⁵. Le renforcement de la régulation des grandes entreprises chinoises (Alibaba, Tencent, Weibo, Didi, ...) à l'été 2021 doit s'interpréter dans ce cadre. Ces dernières vont devoir séparer leurs activités commerciales et financières et mettre fin à des pratiques empêchant la concurrence. Cette stratégie s'oppose à celle américaine et européenne s'appuyant sur des sociétés de service avec une forte valuation boursière, les « licornes » et autres start-up.

Les États-Unis ont perdu depuis plusieurs années la primauté sur les capacités de production de certains composants clés comme les semi-conducteurs face à l'Asie (Taïwan, Corée du sud, Chine) au profit d'un écosystème de services numériques et de ventes d'appareils d'envergure mondiale (GAFAM). L'Europe dispose de très faibles capacités de production, possède peu de mines pertinentes pour le secteur numérique et son écosystème numérique de services est largement investi par les services américains. **Si la Chine mise sur une puissance matérielle du secteur numérique et les États-Unis sur une puissance « servicielle », quelle est la place de l'Union Européenne ?** Et surtout, quelle serait une stratégie cohérente face à la crise environnementale ? Quels seront les territoires à « sécuriser » pour maintenir les flux de matières qui alimentent la croissance du secteur numérique ? Quelles seront les conséquences sociales et environnementales du maintien de cette croissance dans les territoires d'extraction, d'usage et de fin de vie ? Ces questions ne peuvent pas être adressées de front dans ce rapport. Il est toutefois nécessaire de rappeler ces enjeux macroscopiques afin de se pencher dans la question territoriale.

³⁵ Rui Ma, « The China tech bubble is bursting. That's not a bad thing for investors », *Rest of World*, 23 août 2021, consulté le 5 octobre 2021

Nouvelles contraintes climatiques et écosystémiques

Les objectifs de réduction globale des émissions de GES constituent aujourd'hui un horizon partagé à différents degrés dans la politique internationale. Ainsi, de grands pays émetteurs comme les États-Unis, l'Union Européenne ou la Chine ont déclaré des programmes de neutralité carbone entre 2050 et 2060.

Néanmoins, **les émissions de gaz à effet de serre ne représentent pas le seul paramètre de la crise environnementale actuelle** : l'effondrement de la biodiversité, l'acidification des océans, l'augmentation du stress hydrique, le changement d'affectation des sols, l'emballement des cycles biogéochimiques (azote, phosphore) et les autres facteurs qui définissent les limites planétaires proposées par Steffen et al. du « Stockholm Resilience Center ».

À moyen et long terme, les sociétés humaines modernes doivent (devraient) réduire leur consommation d'énergie, décarboner le mix énergétique restant, réduire leur consommation de matières premières (biomasse, métaux, minéraux non-métallique) et les pollutions liées, stopper leur emprise sur de nouveaux sols et favoriser la reconstitution de la biodiversité.

Atteindre ces objectifs est nécessaire pour maintenir les conditions d'habitabilité pour les sociétés humaines, et non-humaines, sur Terre. Depuis de nombreuses années, les effets de la crise environnementale sont visibles. Mais certains effets ont « gagné en visibilité » récemment, notamment les événements climatiques extrêmes (inondations, tempêtes, sécheresses, ...). D'autres, aux conséquences dramatiques, restent néanmoins peu visibles comme l'effondrement de la biodiversité.

Qu'en est-il pour le secteur numérique ? La relative stabilité environnementale et climatique, qui a accompagné l'augmentation fulgurante de la consommation de ressources sur Terre depuis 1950, est potentiellement remise en jeu ainsi que les systèmes de production et d'approvisionnement qui ont

été bâtis dessus. **Est-ce que des mines aux quatre coins du monde pourront fournir la cinquantaine de métaux qui composent un smartphone ?** Est-ce que les zones exploitées fourniront assez de minerai par rapport à la demande croissante du secteur ? Est-ce qu'il sera acceptable de perpétuer la violence et les pollutions locales propres au secteur minier ? La contestation de projets miniers (pour des raisons sociales et environnementales) est un des plus gros facteurs de risque pour les exploitants.

Comment la récurrence d'événements climatiques extrêmes va affecter le fonctionnement de l'infrastructure et des zones de production ? **Les récentes inondations à Zhengzhou ont causé une panne de la boucle locale fournissant internet, privant les habitants de moyen de paiement en ligne, de location de vélo et d'autres services parfois essentiels.** De même, en 2018 Durairajan et al ont superposé l'infrastructure réseau des États-Unis et les projections de montée des eaux, et ainsi estimé que 4 067 miles de fibres optiques et 1 101 « nodes » (Points de Présence, etc.) pourraient être inondés d'ici 15 ans³⁶.

Face à la crise environnementale mondiale, il est donc important de prendre en compte la nécessaire transformation de nos modes de production et de nos modes de vie, l'augmentation des risques sur le fonctionnement de l'infrastructure mais aussi les possibles pénuries et ruptures d'approvisionnement sur certains composants ou appareils clés des systèmes numériques. Finalement, **face à ces enjeux, la pertinence de l'échelle territoriale se révèle d'autant plus importante pour planifier les actions d'adaptation et d'atténuation.**

Dans le contexte de la transition écologique est énergétique, une collectivité devra elle aussi réduire sa consommation d'énergie, réguler l'artificialisation des sols dans son territoire, réduire ses émissions de gaz à effet de serre, repenser sa mobilité et le travail en conséquence, etc. Le mode de développement du secteur numérique pourra parfois rentrer en confrontation au niveau local avec ses plans d'action comme nous le verrons dans les études de cas suivantes.

³⁶ Ramakrishnan Durairajan et al., « Lights Out: Climate Change Risk to Internet Infrastructure », *ANRW* '18, 2018.

Gouvernance locale des infrastructures numériques

Quels sont les enjeux de la gestion territoriale du secteur numérique dans le contexte de la transition énergétique et écologique ? Nous avons vu dans l'analyse précédente des dispositifs nationaux de transition que le secteur numérique en était largement absent. À partir d'études de cas nous essaierons de composer les briques de base pour établir une politique territoriale pertinente avec les enjeux de transition et les intérêts des acteurs du secteur numérique.

La gestion électrique

La politique de gestion électrique est le premier enjeu à prendre en compte dans le développement du numérique sur les territoires. L'industrie des data centers en fournit une illustration.

Le réseau électrique est dispatché dans les villes par des postes sources gérés par le distributeur. En France, Enedis gère cette distribution jusqu'à un certain seuil, RTE s'assure de l'acheminement des très hauts voltages et des grandes demandes de puissances. Un poste source dispose d'une puissance à distribuer (en kVA ou MW) qu'il faut répartir entre résidentiel, tertiaire, industriel, transport, etc. Une industrie réserve une puissance correspondante à son pic de production et, possiblement, au développement futur de sa chaîne de production.

Les opérateurs de centres de données font de même mais dans des ordres de grandeur surprenant par rapport à leur opérations. La réservation de puissance et la consommation étant opaques, il est très difficile de comprendre pourquoi les opérateurs réservent autant d'électricité. Soit, ils souhaitent occuper le terrain pour éviter une potentielle concurrence électrique, soit cela est lié à des développements futurs très importants. De plus, les opérateurs de centres de données réservent la même puissance sur deux postes sources différents afin d'avoir une ligne de secours si l'un des deux postes sources subit une panne. Lorsque les réservations de puissance amènent les postes sources à bout de leur puissance disponible, le distributeur d'électricité contacte la collectivité pour l'informer de la situation,

amenant parfois à la construction d'un nouveau poste source (pour plusieurs millions d'euros et une dizaine d'années de travaux avant mise en service). **Il est donc très important par la collectivité d'être tenue au courant de la réservation faite par l'opérateur de centres de données, et, si possible de conclure un accord pour que la réservation soit cohérente avec la puissance disponible et les autres perspectives de développement de la collectivité** (industrie, transport en commun, logements, etc.).

Au-delà de la réservation de puissance, il est important de maîtriser la consommation électrique des centres de données afin qu'elle s'inscrive dans le plan de transition énergétique de la collectivité. Par exemple, **en 2020, les centres de données représentaient 11% de la consommation d'électricité en Irlande** et, d'après le distributeur national EirGrid, cette consommation pourrait atteindre 27% en 2029 au rythme actuel. En outre, les centres de données pourraient absorber la capacité d'énergie renouvelable sur le réseau ralentissant la transition énergétique du pays et des autres secteurs.

Par rapport à la consommation électrique des centres de données, les équipements de réseau représentent une consommation plus marginale et dispersée sur le territoire (stations de base, placards fibre, points de mutualisation, ...). Le développement du *edge computing* et l'augmentation des *small & macro cells* pourraient impliquer toutefois que les sources d'énergie soient directement installées au pied ou vers les équipements réseaux (panneaux solaires, etc.). Cela amènerait alors de nouvelles problématiques de consommation électrique marginale, liées à l'installation d'équipements de refroidissement et de stockage d'énergie (batteries).

La consommation électrique des équipements utilisateurs (smartphones, tablettes, télévisions connectées, ordinateurs fixes, consoles de jeu, objets connectés) est généralement incorporée dans la consommation des foyers. Certains équipements ont

une consommation marginale (smartphones, tablettes) et d'autres représentent une source de consommation plus importante, comme les télévisions de grande taille. Au niveau de la collectivité, l'usage d'écrans publics et de caméras de surveillance restent à interroger et analyser à l'échelle territoriale.

Étude de cas : Plaine Commune

L'implantation des centres de données à Plaine Commune, dans le nord de Paris, a fait l'objet de la thèse de Clément Marquet³⁷. Ses travaux de recherche ont permis de relever les nombreuses discussions et tensions locales liées à l'arrivée de nouveaux opérateurs de centres de données dans la collectivité : emploi, nuisance, consommation d'électricité, etc. Par exemple, l'Agence Locale Énergie Climat (ALEC) en charge du Plan Climat Énergie Territoire (PCET) en 2013 avait pour objectif de réduire les émissions de GES de la collectivité de 20% et autant en consommation d'énergie. **Ce plan local est rentré en frottement avec la consommation d'électricité requise par les opérateurs de centres de données, ce qui a donné lieu à une confrontation entre élus locaux.** Certains élus mettaient en avant les nouveaux emplois et l'arrivée d'une industrie innovante, d'autres mettaient en garde sur la faible capacité d'emploi du secteur et sur l'impossibilité de respecter le plan local Énergie Climat face à la demande d'électricité des nouveaux venus.

³⁷ Clément Marquet, « Binaire béton : Quand les infrastructures numériques aménagent la ville », Thèse de sociologie, Université Paris-Saclay, 2019, p. 21, consulté le 4 octobre 2021

Ce cas est représentatif à de nombreux égards des enjeux liés à l'implantation des centres de données. Le graphique ci-dessus résume l'ensemble des enjeux qui se sont joués en 2013 lors de l'implantation d'un nouveau centre de données à St-Denis. Ce cas nous permet de pointer sur l'importance des réseaux de distribution dans la présence des centres de données. **Si l'accès au réseau électrique, internet (backbone) et parfois d'eau (surtout aux USA) est clé dans le choix de l'emplacement de ces infrastructures, le poids qu'elles font peser sur les réseaux de la collectivité doit être pensé en amont et régulé dans la perspective d'une transition énergétique et écologique.** La question de l'occupation des sols ne doit pas être sous-estimée, en 2015 les centres de données (1/3 du parc français) représentaient une surface de 140 000m² en Île-de-France³⁸. Cependant, une partie de ces centres de données s'installent dans des surfaces industrielles déjà existantes (tris postaux, usines, etc.)³⁹.

³⁸ « 180 000 m² de data centers en Ile-de-France », *Journal du Grand Paris*, 1er décembre 2015, consulté le 6 octobre 2021.

³⁹ Pour aller plus loin sur la question territoriale des centres de données il est conseillé d'aller chercher directement des informations dans les travaux de Cécile Diguët et Fanny Lopez, notamment le rapport « [Territoires numériques et transition énergétique : les limites de la croissance](#) », rédigé pour la Chaire « Cities and Digital Technology », Sciences Po en 2019

Voir schéma page suivante

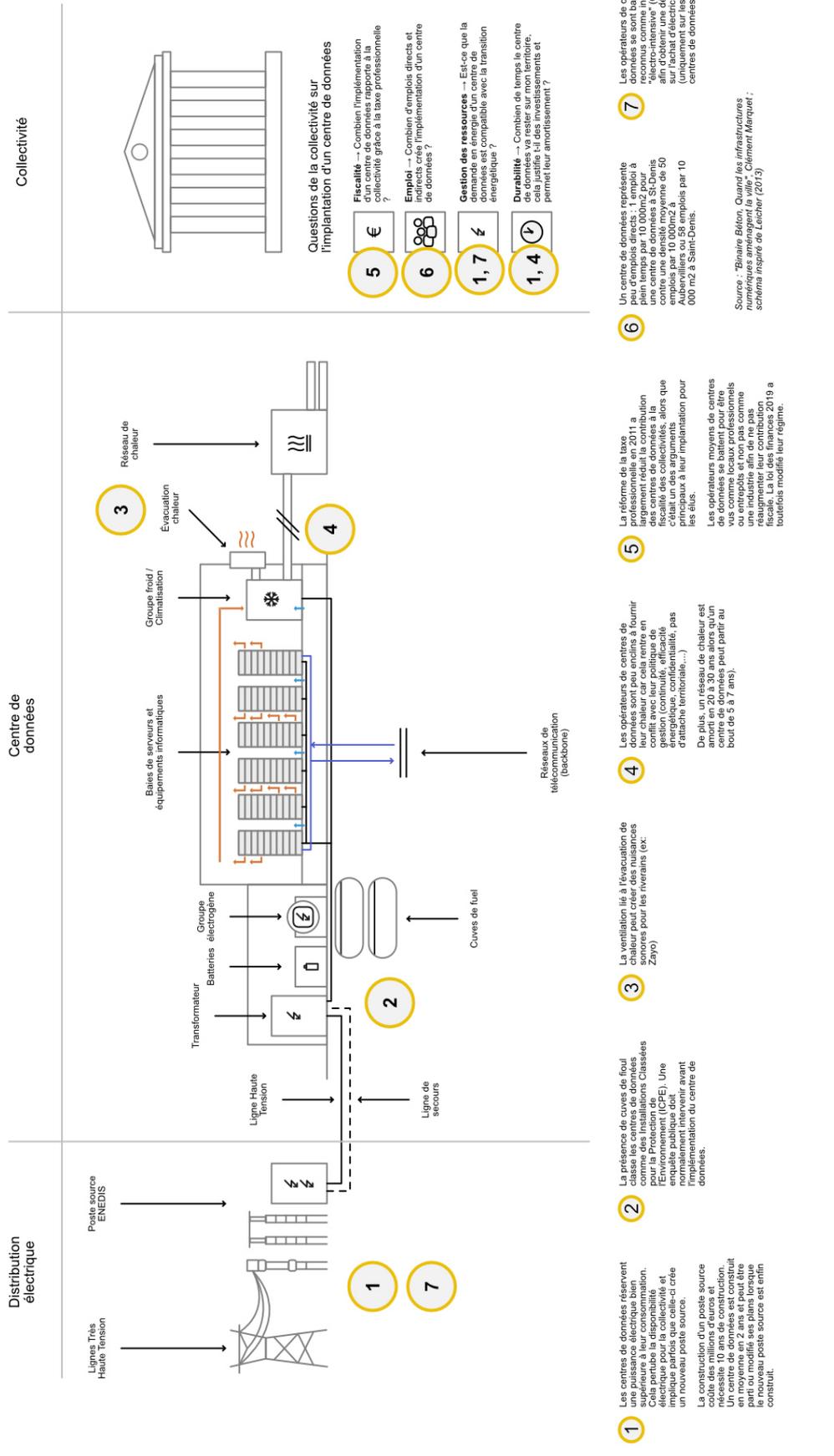


Fig 5 – Enjeux d'implantation de centres de données à Plaine d'après la thèse de Clément Marquet

La gestion de l'eau

La gestion de l'eau est le deuxième enjeu environnemental que le secteur du numérique impacte territorialement. Mise à part quelques centres de données avec un refroidissement par circuit d'eau, la France dispose de peu d'équipements numériques consommateurs d'eau durant leur phase d'usage. Il existe plutôt une consommation indirecte liée à la consommation d'électricité. L'empreinte eau de la production d'électricité française serait de 4 L / kWh. Dans d'autres pays comme les États-Unis, la consommation directe et indirecte peut prendre une importance plus élevée comme en témoigne l'exemple des grands data centers.

De quel ordre est le prélèvement direct d'eau d'un centre de données ? Cela dépend de la localisation du centre et du climat. **Un centre de données de taille moyenne en Californie consommerait jusqu'à 1 600 m3 par jour.** Une partie de cette eau est évaporée et donc ne poursuit donc pas son cycle habituel, c'est pour cela qu'on dit qu'elle est consommée. Toutefois, différents types d'eau peuvent être utilisés – potable, non-potable, eaux de rejet – et surtout l'eau peut être recyclée pour être utilisée plusieurs fois dans le circuit ou être rejetée dans le réseau (ces processus peuvent porter plusieurs termes – réclamation, recyclage, conservation). Par exemple, à Red Oak, Texas, [Google](#)

[demandait 5,5 milliards de litres d'eau à l'année pour un de ses centres de données](#), soit presque 10% de la consommation annuelle du county. À Mesa, Arizona, un projet de centre de données géant, supposément pour Facebook, [a fait une demande initiale de 1,85 millions de litres d'eau par jour, soit 681 millions de litres par an](#) et 1,9 milliard par an dans la 3e phase de son développement. Dans la même ville, de nombreux centres de données sont déjà présents, et **Google est actuellement en train de construire un centre qui utilisera 3,8 à 15 millions de litres d'eau par jour. La plupart de l'eau provient du fleuve Colorado dont le niveau descend et dont les ressources ont été sur-allouées d'après un rapport de l'Université d'Arizona**⁴⁰. Les GAFAMs compenseraient leur consommation d'eau grâce à des projets de restauration d'eau (water restoration). Cependant le fonctionnement de ces mécanismes est encore obscur et reste à étudier dans le paysage légal américain.

Aujourd'hui, cet enjeu est mineur en France vu le très faible nombre d'infrastructures numériques utilisant de l'eau pour leur refroidissement. Toutefois, si cette pratique devait se développer il serait alors nécessaire pour les collectivités de faire preuve d'une vigilance accrue.

³⁶ Kathleen Ferris et Sarah Porter, « The Myth of Safe-Yield: Pursuing the Goal of Safe-Yield Isn't Saving Our Groundwater », Arizona State University, mai 2021.

Étude de cas : Ouest américain et stress hydrique

Au-delà de la pression que peuvent exercer les centres de données sur les réseaux électriques, la question de la consommation peut être problématique dans d'autres régions du monde. Durant ces dernières années, les plus grands centres de données (hyperscale), notamment ceux des GAFAMs ont commencé à utiliser un circuit d'eau froide (par évaporation directe) plutôt que de la climatisation pour refroidir leurs installations. Cela se traduit par une baisse de la consommation électrique et une augmentation de la consommation hydrique. En l'occurrence, le refroidissement par l'eau est beaucoup plus efficace dans les climats très secs, ce qui a désigné les zones sèches, voire désertiques, des États-Unis comme des endroits propices à l'installation des centres de données géants. **Un centre de données géant peut représenter une consommation d'eau importante par rapport à la collectivité qui l'accueille. Par exemple, les prélèvements d'eau du centre de données à Red Oak, Texas, représente presque 10% de la consommation d'eau de la ville.**

On retrouve donc de nombreuses infrastructures de ce type dans l'Utah, le Nevada, l'Arizona ou en Californie. Or, ces états connaissent un stress hydrique élevé et les consommations d'eau sont suivies de près notamment par les collectivités. **Le changement climatique va favoriser l'intensité des événements climatiques extrêmes comme les sécheresses et ainsi mettre encore plus en tension la gestion de l'eau dans ces États.** Difficile alors de comprendre la stratégie à long terme des opérateurs de centres de données face à des possibles difficultés d'approvisionnement en eau ou une élévation des prix de l'électricité ou de l'eau, ou tout simplement quand le stress hydrique s'accroît rapidement comme en période de sécheresse, ce qui se passe actuellement dans l'ouest américain.



Fig 6 – Consommation d'eau de quelques centres de données de Google et Facebook (d'après les données disponibles)

L'aménagement de la fibre / réseaux mobiles

Le troisième enjeu territorial liant numérique et environnement, concerne les infrastructures de réseau, de la fibre optique aux réseaux mobiles.

Aujourd'hui, la fibre optique est le moyen le plus efficace de transmettre des données. Son empreinte environnementale se situe davantage sur la phase de déploiement (génie civil, tranchées, etc.) que sur la phase d'usage. De leur côté, les réseaux mobiles 2G/3G/4G/5G sont supportés par des stations (équipées d'antennes), qui permettent la connexion aux réseaux fixes. En ce sens, **les réseaux mobiles couvrent en quelque sorte le « dernier kilomètre » entre un équipement mobile et un réseau fixe.**

L'aménagement des réseaux de télécommunications a fait l'objet de nombreuses politiques publiques dont les plus récentes sont le New Deal Mobile et le Plan France très haut débit. En zone urbaine, la pose de la fibre s'appuie sur les réseaux (eau et électricité) et des installations existantes (fourreaux, chambres, etc.). **Les opérations de raccordement et de maintenance peuvent toutefois s'avérer complexes notamment à cause de chaînes de sous-traitance visant à réduire les coûts pour les opérateurs.** Néanmoins, l'installation des réseaux en zone densément peuplée

reste rentable pour ces derniers car l'installation d'une antenne touche naturellement de nombreuses personnes avec des usages potentiellement intensifs.

Dans des zones plus enclavées, l'installation de la fibre peut se révéler très chère et moins adaptée. Par exemple, en Ardèche et Drôme, pour l'installation du réseau public FTTH (Fiber-To-The-Home), **la connexion de 97% des foyers et des entreprises d'ici 2025 (soit 311 000 lignes à construire), est estimée à un budget de 480 millions d'euros (dont 146,8 millions soutenus par l'État)⁴¹.** Il est demandé alors aux intercommunalités d'investir 93,3 millions d'euros ce qui semble démesuré par rapport aux capacités d'investissement de celles-ci. La possibilité d'une antenne 4G (raccordée à la fibre ou à un faisceau hertzien) bien dimensionnée serait sûrement une approche territoriale et économique plus appropriée selon les conseillers municipaux que nous avons rencontrés. L'aménagement des réseaux implique de nombreuses opérations de génie civil et une logique de déploiement coûteuse qui accapare des ressources financières locales. Une logique de déploiement adaptée aux besoins d'un territoire et à ses capacités de financement devrait être considérée afin d'attribuer des budgets vers d'autres enjeux de transition.

⁴¹ « La Fibre pour tous ! », Ardèche Drôme Numérique, avril 2021, consulté le 6 octobre 2021.



Fig 7 – Site de station 4G alimentée par une génératrice à défaut de raccordement électrique en Ardèche

L'occupation des sols

Le quatrième enjeu concerne les politiques d'occupation des sols.

L'occupation des sols est un enjeu principalement lié au développement des centres de données géants (hyperscale) alors que **les grands opérateurs de centres de données (Equinix, Interxion, GAFAMs) multiplient les annonces d'ouverture et les investissements pour construire toujours plus de centres**. Les plans d'action des collectivités invitent à réduire et stopper l'artificialisation des sols et la question de la « zéro artificialisation nette » prend une place de plus en plus importante. Les centres de données ne sont évidemment pas les seuls acteurs

impliqués dans cette situation, toutefois leur développement rapide interroge sur la capacité des métropoles à accueillir ces acteurs tout en respectant leur politique de zéro artificialisation nette. Rien qu'à Francfort les centres de données occupent 640 000 m² (0,25% de la superficie de Francfort) et 270 000 m² sont en projet, soit au total 0,36% de la superficie de la ville.

Fanny Lopez conseillait de penser l'intégration spatiale des centres de données à partir des points suivants⁴² : adapter le bâtiment au tissu local, faire monter les installations en verticalité pour réduire l'emprise sur les sols, définir les possibilités d'extension en amont, etc.

⁴² Fanny Lopez, Maximilian Gawlik et Lisa Gaucher, « Data Centers: Anticipating and planning digital storage », *Institut Paris Région*, mai 2021.

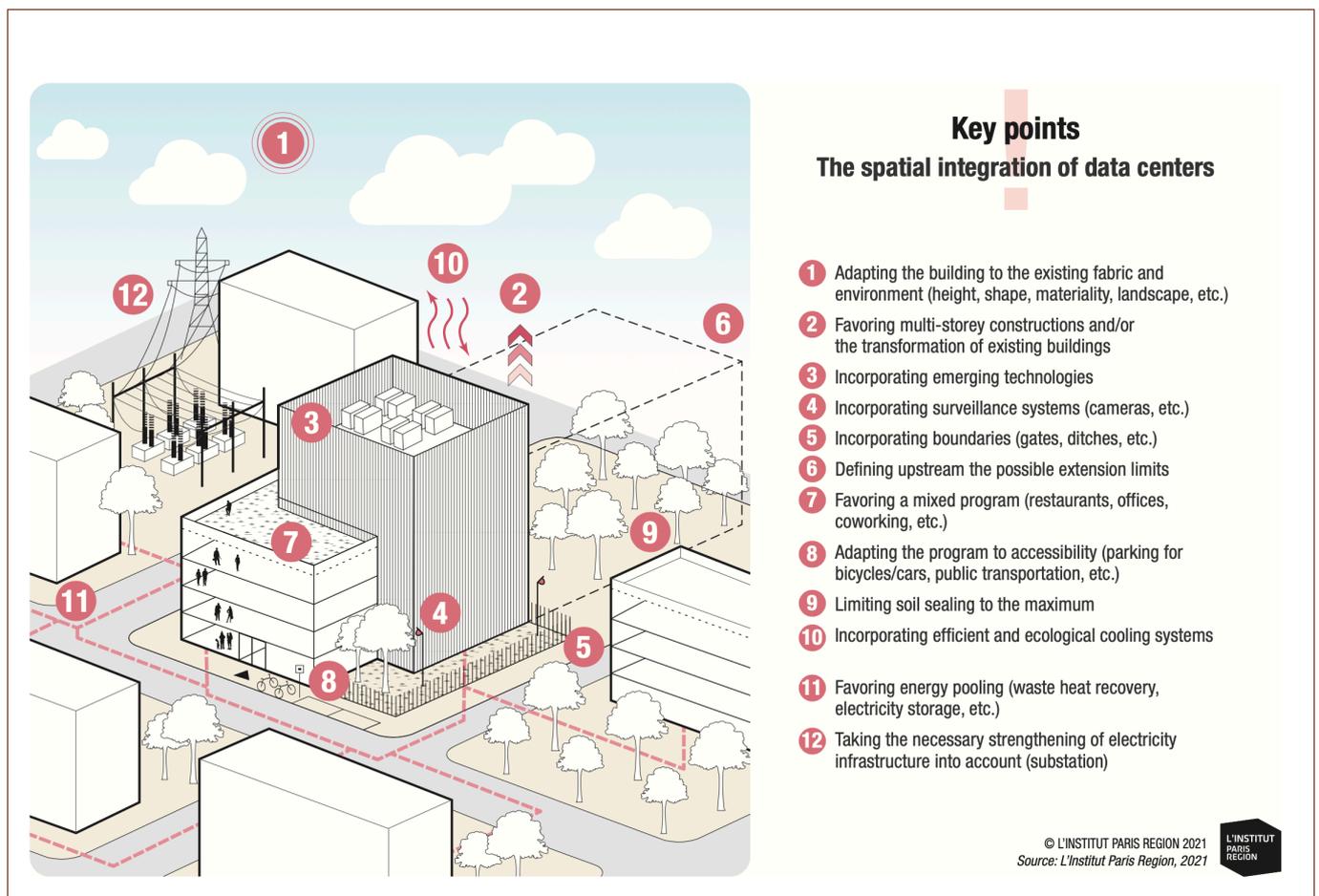


Fig 8 – Propositions de l'Institut Paris Région pour penser l'intégration spatiale des centres de données

Le développement industriel

Le cinquième enjeu a trait aux politiques territoriales de développement industriel.

Dans le cadre de ce rapport, **le thème de l'industrie peut être abordé par deux perspectives : l'adaptation de la chaîne industrielle essentielle au secteur numérique à la crise environnementale, et les effets de la numérisation sur le secteur industriel d'un pays ou d'un territoire donné.** En effet, la numérisation des sociétés repose sur une intense production industrielle de composants clés comme les semi-conducteurs (utilisé par extension pour nommer les puces électroniques). Où se situe cette production et quelle sera sa marge d'adaptabilité face à une augmentation des risques environnementaux et, en même temps, une augmentation des volumes de production ? Le cas de Taïwan est exemplaire pour illustrer ces tensions.

Étude de cas : l'industrie électronique à Taïwan

Taiwan a vécu au printemps 2021 sa pire sécheresse en 56 ans. L'absence de typhons et les faibles pluies de l'année dernière n'ont pas permis de remplir suffisamment les réservoirs de l'île. Ce phénomène arrive au moment même où la demande en semi-conducteurs et en circuits intégrés explose : des composants dont Taiwan est le principal fournisseur et dont la fabrication est très gourmande en eau. **Ce secteur industriel est une clé de voûte technologique et géopolitique de l'île et un goulot d'étranglement dans les chaînes de production mondiales du numérique.** Cet entremêlement de phénomènes climatiques extrêmes liés au changement climatique et de politiques de développement industriel offre un cas précieux pour comprendre l'avenir climatique du secteur numérique et ses nouvelles conditions matérielles de production pour le siècle à venir.

À la mi-avril 2021, le niveau de la plupart des réservoirs continuait de baisser. Depuis février, le gouvernement taiwanais mit en place plusieurs restrictions : les usines et

parcs industriels dans le centre et le sud de l'île devaient réduire leur consommation d'eau jusqu'à 15%. Le 24 mars la ministre de l'économie annonça la suspension deux jours par semaine de l'approvisionnement en eau de trois municipalités (Taichung, Maoli, Changhua)⁴³. Ce sont 1 064 000 personnes qui ont été affectées par ce rationnement, soit 4,35% de la population de l'île. **Le gouvernement décida aussi d'arrêter l'irrigation de 74 000 hectares de terres agricoles au profit, semble-t-il, des usines de fabrication de semi-conducteurs et circuits intégrés**⁴⁴.

Pourquoi la sécheresse actuelle affecte-t-elle l'industrie des semi-conducteurs et des puces électroniques ? Certaines étapes de fabrication de cette industrie sont particulièrement consommatrices en eau. On distingue notamment deux types d'eau, l'eau purifiée et l'eau de refroidissement⁴⁵. Par exemple, les disques de silicium (wafer) servant de base à la gravure doivent être "rincés" avec de l'eau purifiée (Ultra Pure Water, UPW) afin d'enlever toute impureté. Ces disques seront aussi

⁴³ Liang Pei-chi, Elizabeth Hsu & Matthew Mazzetta, « Water supply to be cut 2 days per week in parts of central Taiwan », *Focus Taiwan*, 24 mars 2021, consulté le 15 avril 2021

⁴⁴ Raymond Zhong & Amy Chang Chien, « Drought in Taiwan Pits Chip Makers Against Farmers », *New York Times*, 13 avril 2021, consulté le 20 avril 2021.

⁴⁵ Sarah B. Boyd, « Life-Cycle Assessment of Semiconductors », (Springer: New-York, 2012)

immergés dans de l'eau lors de la gravure des composants sur leur surface (Immersion Lithography). De même, la course à la miniaturisation des circuits a amené au développement de nouvelles techniques de gravure de pointe (Extreme Ultraviolet Lithography, EUV) qui auront des besoins en eau plus importants pour leur refroidissement que les générations

actuelles⁴⁶. En fonction d'où se trouvent les installations, la consommation indirecte en eau peut augmenter selon des méthodes de production d'électricité (centrale vapeur, etc.). En termes d'évolution de méthodes de production, il ne semble pas que l'industrie se dirige vers une réduction de sa consommation d'eau totale.

⁴⁶ Andreas Thoss, « EUV lithography revisited », *LaserFocus World*, 29 août 2019, consulté le 20 avril 2021.

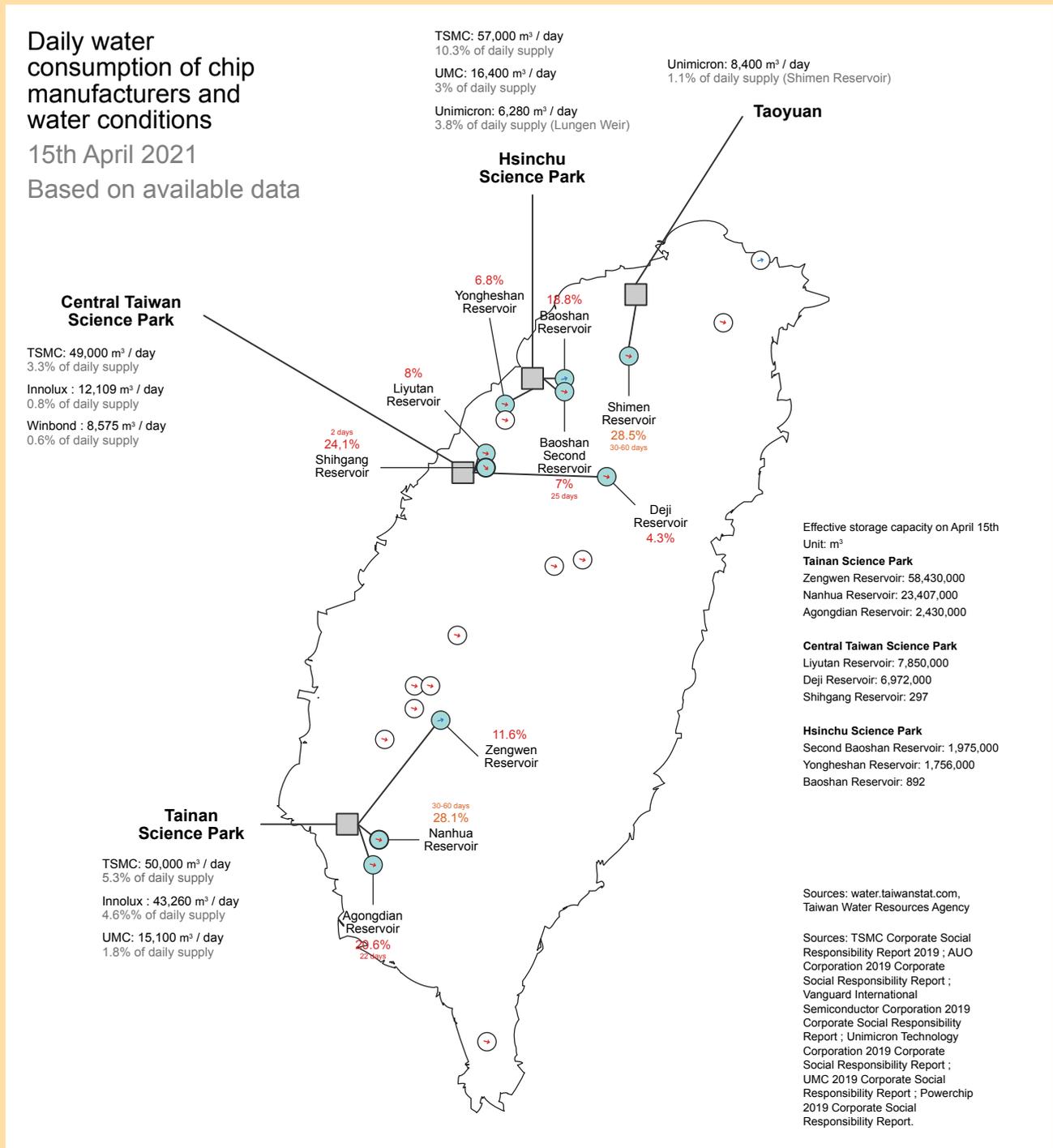


Fig 9 – Consommation d'eau des usines de semiconducteurs à Taiwan en avril 2021

La numérisation est aussi un phénomène qui a avancé de front avec la financiarisation qui a modifié la circulation des flux de capitaux et les logiques d'investissement, mais aussi avec la conteneurisation qui a révolutionné le secteur logistique. Ces trois phénomènes ont profondément transformé le secteur industriel. Les chaînes de production ont été numérisées (bras robots, systèmes de contrôle, maintenance, ...) mais les produits intègrent aussi de

plus en plus d'électronique permettant du calcul, du stockage mais aussi du transfert de données. Cela implique que des chaînes de production industrielle sont dépendantes de la fourniture en composants électroniques. En fonction de la capacité à être livré sur ces composants, les industries locales peuvent plus ou moins être fragilisées et cela pose la question de la souveraineté et de la maîtrise des chaînes industrielles « numérisées ».

Étude de cas : l'impact de la pénurie de semi-conducteurs sur le secteur automobile

Dans la continuité de l'étude de cas précédente, il est intéressant de relever comment la pénurie de semi-conducteurs a eu un impact sur d'autres secteurs, notamment l'industrie automobile.

Face à la hausse généralisée de la demande, les fabricants ont favorisé les commandes avec la plus haute rentabilité et ont remis en bas du carnet de commandes celles qui étaient les moins rentables. **Cette priorisation implique donc des retards sur certains types de produits. Le secteur automobile, peu rentable pour un fabricant de puces, a subi aussi une rétrogradation dans les carnets de commande.** Cependant, les commandes prioritaires subissent aussi des retards liés à l'inadéquation de la demande et des capacités de production : PS5, MacBook Pro, iPad, ... TSMC, Samsung, Foxconn et d'autres grands fabricants ou assembleurs ont annoncé que les retards continueront jusqu'en 2023.

D'après les analystes de marché, la pénurie de semi-conducteurs a réduit la production de véhicules de plus de 4 millions d'unités rien que pour le 1er semestre 2021. Les chaînes d'approvisionnement du secteur automobile ont été particulièrement fragilisées. Cela rappelle un point important : **numériser sa chaîne de production et les équipements produits revient à caler son rythme de production sur celui des fonderies de semi-conducteurs à Taiwan et à d'autres pays d'Asie.** L'Europe et les États-Unis n'ont peu ou pas de souveraineté sur cette partie de la chaîne. Ils sont en situation de dépendance face à un maillon critique de la numérisation. Deloitte estimait que 40% du coût d'une voiture en 2017 était lié à ces systèmes, et

projette un coût de 50% d'ici 2030⁴⁷. L'électrification et la course à l'autonomie vont d'autant plus renforcer cette dynamique.

L'Europe et les États-Unis ont lancé des plans de financement de leur propre industrie électronique mais seules les années diront si ces deux zones ont réussi à rétablir leur souveraineté. **Cela semble peu probable à court terme vu la complexité et la globalisation des chaînes de production. Même si elles arrivaient à créer des capacités de production satisfaisantes reste la question de l'approvisionnement en métaux.** En 2020, la Commission Européenne a mis à jour la liste des matières critiques pour l'Union. Alors qu'il y avait 14 métaux en 2011, la liste en compte maintenant 30. Une partie de la stratégie européenne repose sur une augmentation des capacités de recyclage. Si l'Europe souhaite acquérir une souveraineté minérale, cela signifierait, dans une moindre mesure, ouvrir des mines sur le sol européen avec des marchés protégés pour les matières ou alors des garanties d'achat. Toutefois, cela impliquerait de rapatrier les pollutions dévastatrices liées à l'industrie minière notamment sur la biodiversité, les sols, l'eau et les communautés humaines et non-humaines.

La numérisation des équipements enferme nos capacités de production dans une dépendance à des chaînes d'extraction et de production sur lesquelles l'Europe, ainsi que ses industries, n'ont que peu de prises, tout en délocalisant les impacts environnementaux les plus sévères. La crise traversée par le secteur automobile rappelle que les enjeux environnementaux du numérique et ceux de transition s'intègrent dans une géopolitique mondiale.

⁴⁷ Deloitte Touche Tohmatsu Limited, « Semiconductors – the Next Wave Opportunities and winning strategies for semiconductor companies », Deloitte, 2019, pp. 14-15, consulté le 4 octobre 2021

Les politiques d'achat des collectivités

L'enjeu suivant pour les collectivités concerne leur politique d'achat.

Alors que **la France et l'Europe disposent de très peu de capacités de fabrication sur les équipements numériques (notamment grand public), la marge de manœuvre est très réduite sur la modification des processus industriels.** Les collectivités peuvent néanmoins agir grâce à leurs politiques d'achat.

Les impacts environnementaux des équipements grand public (smartphones, ordinateurs, ...) se situent en grande majorité dans la phase de fabrication. Il est donc particulièrement pertinent de rallonger la durée de vie des équipements en ralentissant la politique de renouvellement et en favorisant l'achat de matériel réparable et mis à jour régulièrement. Un [guide d'achat écoresponsable](#) a été mis à disposition par la Direction Interministérielle du Numérique (DINUM) et se révèle être une source technique précieuse pour la DSI d'une collectivité.

Étude de cas : politique d'achat de la région Bretagne

La région Bretagne est en train de préparer sa politique d'achat de matériel informatique et souhaite une approche en plusieurs phases :

- analyser le besoin auquel répond le matériel
- définir ses caractéristiques techniques attendues en conséquence et tenter de les graduer par importance (ex : téléphonie : durabilité - fort critère - grand écran lisible - faible critère)
- obtenir l'impact GES d'un modèle générique, tenter de travailler sur la détermination du GES du(es) modèle(s) précédent(s)
- comprendre les choix technologiques fait précédemment (Était-ce des choix complètement techno-centrés ? Était-ce des projections ? Sur quels critères ?)
- effectuer une veille technologique sur chaque typologie de matériel
- documenter les différentes phases importantes du cycle de vie de nos matériels dans l'organisation et les process associés (ex : achat - réparabilité - fin de cycle - 2nde vie)

Une fois ces étapes franchies, ils pourront, en s'appuyant sur le guide de la DINUM, déterminer les meilleures pratiques sur les marchés pour :

- sourcer la maturité du marché sur les critères environnementaux
- déterminer les éco-conditionnalités
- déterminer les critères environnementaux
- documenter des modèles marchés associés sur chaque typologie de matériel
- documenter le réemploi, la réparabilité et la durabilité des matériels

Économie circulaire et gestion des déchets

Enfin, le dernier enjeu articulant transition numérique et environnementale est celui de l'économie circulaire et de la gestion des déchets.

Sur les 53 mégatonnes (Mt) de Déchets d'Équipements Électriques et Électroniques (DEEE) générés dans le monde en 2020, 12 Mt était attribuable à la zone Europe, à hauteur de 16,2 kg par personne⁴⁸. Sur ces 12 Mt, 5,1 Mt de ces déchets ont été documentés afin d'être collectés et recyclés⁴⁹. À ce titre, l'Europe a largement le plus haut taux de collecte du monde. En France, **l'éco-organisme Ecologic, gérant la collecte des DEEE, a capté 51,9% des DEEE du territoire, représentant cependant que 23,7% des tonnages totaux**⁵⁰.

En France, parmi les petits équipements informatiques et de télécommunication (Catégorie 6) ménagers collectés, 72,9% partent en recyclage ou en réutilisation, 16,7% en élimination et 10,4% en valorisation⁵¹. En termes de matières sur l'ensemble des DEEE, les principales ressources récupérées sont les métaux ferreux. Les enjeux de recyclage et de récupération des ressources des DEEE sont un enjeu fort, dans la mesure où l'Europe dispose de très peu de gisements et mines exploitables pour les petits métaux et métaux rares nécessaires à la fabrication des équipements. Par l'exemple, **l'usine de recyclage d'Umicore à Hoboken (Belgique), qui traite 17 métaux issus de matériaux divers comme les téléphones portables, ordinateurs, équipements industriels, est une des plus grandes raffineries de métaux précieux dans le monde**. En termes de tonnage extrait, le site d'Hoboken pourrait être la 3e mine d'or du monde.

Améliorer le travail de collecte avec Ecologic va devenir de plus en plus important pour les collectivités au fur et à mesure que ces flux de déchets vont augmenter. La numérisation croissante implique en effet des équipements électroniques à faible durée de vie et des

taux de consommation élevés. De même, l'implantation d'usines de traitement/recyclage/raffinage spécifiques aux DEEE peut devenir un enjeu majeur alors que la liste des matériaux critiques de l'Union Européenne augmente d'année en année⁵² (14 matières critiques en 2011, 27 en 2017, 30 en 2020) et que la plupart sont des matériaux utilisés pour les équipements électroniques. La difficulté va être de mobiliser les capitaux nécessaires à un tel projet (l'usine d'Hoboken représente un investissement d'1 milliard d'euros) et de maîtriser les pollutions locales liées à ce type d'activités. Dans tous les cas, l'économie circulaire et le recyclage / récupération des matériaux dans les DEEE est un axe stratégique majeur de l'Union Européenne pour maintenir une souveraineté partielle sur ses approvisionnements de ressources minérales et pour son industrie électronique.

⁴⁸ Vanessa Forti et al. «The Global E-waste Monitor 2020: Quantities, flows and the circular economy potential », *United Nations University (UNU)*, 2020, p.14.

⁴⁹ Ibid.,

⁵⁰ « Rapport d'activité 2020 », *Ecologic*, 2020, p.30.

⁵¹ Ibid., p.64.

⁵² « Critical Raw Materials Resilience: Charting a Path towards greater Security and Sustainability », *European Commission*, 9 mars 2020.

Les chantiers d'aujourd'hui et de demain

Les différents sujets relevés le long de ce rapport amènent à poser la question du développement du secteur numérique sur une typologie large de territoires (zones urbaines, déserts, zones industrielles, villages, etc.) soumis à une transformation profonde de leurs conditions matérielles et écologiques. Cette question anime les enjeux d'aménagement et de régulation, mais aussi des enjeux de connaissances pour informer les arbitrages des instances de décision locales ou nationales. La question de l'aménagement du territoire entre en résonance avec la planification à moyen et long terme demandée par les efforts de transition énergétique et écologique, ainsi que par les stratégies d'adaptation et d'atténuation. Nous évoquerons ici quelques chantiers qui paraissent nécessaires pour penser au niveau territorial l'aménagement du secteur numérique et le respect des plans de transition écologique.

L'enjeu crucial de l'ouverture des données environnementales

Une des premières difficultés est le problème d'accès de données ouvertes, vérifiées et auditable pour quantifier les impacts environnementaux d'un système, d'un service ou d'une infrastructure numérique. De nombreuses initiatives ont émergé dans le paysage français. Par exemple, **le projet NégaOctet, en partie financé par l'ADEME, a permis de mettre à jour les inventaires et les données (15 000 points de données) utilisés pour l'analyse de cycle de vie de produits et services numériques.** Toutefois, seulement 20% des données seront rendues publiques, le reste du jeu de données sera accessible via une version payante, faisant parfois office de barrière pour les professionnels et les collectivités qui ne disposent pas des moyens financiers. En parallèle, le projet [Boavizta](#) est un groupe de travail visant à produire un outil de mesure environnementale d'un système numérique. **Le groupe a mis comme prérogative principale à leur travail l'ouverture complète des données et des modèles de calcul.** Ce genre d'initiatives sont à favoriser pour permettre une

meilleure compréhension générale aux praticiens et aux acteurs publics et privés, mais aussi pour structurer des données viables pour l'ensemble des parties prenantes.

Au niveau des collectivités, **il s'agit de favoriser les politiques d'open data sur le sujet afin d'alimenter les bases nationales et les connaissances générales.** Notamment des bases de recensement des infrastructures numériques (centres de données, réseaux (via Cartoradio), centres de traitement de déchets) et des flux (importation de matériel et typologie, flux de déchets) seront une avancée nécessaire pour comprendre ce qui est en jeu lorsque l'on poursuit un effort de numérisation.

Comment former ?

La loi « Réduire l'empreinte environnementale du numérique en France », aujourd'hui en seconde lecture au Sénat, prévoit dans sa forme actuelle l'obligation de formation des étudiants ingénieurs aux enjeux de sobriété numérique et d'écoconception. **Comment formerons-nous ces étudiants sans données ouvertes sur lesquelles ils peuvent s'entraîner à la modélisation des impacts ?** Pour appuyer le point précédent, l'ouverture des données est également un enjeu majeur d'éducation.

Au-delà des données, quels types de programme doivent être mis en place pour former des futurs professionnels à gérer de front la numérisation croissante du monde et la crise environnementale planétaire ? Dans le cadre de la gestion territoriale, il semble nécessaire de former les étudiants à l'histoire des techniques et grâce à des disciplines connexes comme les Science and Technology Studies (STS). De même, une compréhension fine des méthodologies d'évaluation d'impacts environnementaux, comme l'analyse de cycle de vie, semble nécessaire pour développer un esprit d'analyse sur les différents chiffres circulant sur le sujet. Finalement, **les questions d'approches territoriales et la capacité à analyser l'impact socio-environnemental d'un système**

numérique à l'échelle d'un territoire donné seront la pierre angulaire pour porter des nouvelles politiques d'aménagement et de régulation⁵³.

Démarches d'enquêtes locales dans un secteur global

La question de l'aménagement des infrastructures numériques couplée à la question de l'adaptation à la crise environnementale planétaire met en exergue la nécessité d'enquêter localement sur les conditions territoriales. En effet, une logique d'aménagement « colbertiste » ne peut plus suffire au moment où nous allons devoir ajuster nos modes de production et nos modes de vie beaucoup plus finement dans des conditions locales et globales données.

En écho à cela, il est nécessaire de comprendre que des acteurs monopolistiques comme **les GAFAM ne sont pas que des fournisseurs de service mais aussi des aménageurs du territoire**. Au-delà de l'implantation de centres de données, ces entreprises ont une influence concrète sur l'aménagement des réseaux électriques et des réseaux d'eau. Amazon crée ses propres postes source pour gérer l'approvisionnement électrique de ses centres de données (comme d'autres industries), Google construit à Santa Clara ses propres stations de pompage pour gérer le refroidissement de ses installations. Facebook multiplie les investissements pour construire éoliennes et panneaux solaires pour décarboner l'électricité qui alimentent ses centres. Comme n'importe quelle industrie, l'installation d'un acteur central de l'économie numérique dans un territoire est donc loin d'être anodine et peut potentiellement affecter la souveraineté d'une institution sur un territoire et amener à des conflits d'usage.

La perspective d'emploi et de retombées fiscales que représentent les installations numériques sont cependant difficiles à refuser pour une collectivité, même si des risques de précarisation de l'emploi et de conflits avec les intérêts de la collectivité existent. Une compréhension de son territoire et de son évolution à moyen et long terme (réduction des

émissions, énergie et eau disponible, résilience des installations, ...) donc alors être un cadre d'analyse fondamental pour accepter, modifier, refuser l'implantation des installations d'un acteur du secteur numérique.

⁵³ À titre d'inspiration, le programme d'un mastère en « Études environnementales des technologies numériques » (Masters of Environmental Studies for Digital Technologies) est proposé [ici](#).

Recommandations

1. Intégrer l’empreinte environnementale du secteur numérique dans les plans et contrats de transition énergétique et écologique (PCAET, CRTE, etc.)
2. Intégrer une personne compétente au sein des collectivités pour gérer les questions environnementales du numérique
3. Faire un audit de l’empreinte matérielle (infrastructures, flux, etc.) du secteur numérique sur son territoire.
4. S’informer et négocier la réservation de puissance et la consommation d’électricité de l’opérateur de centres de données pour qu’elle soit cohérente avec le plan local de transition énergétique
5. S’informer et négocier la réservation d’eau et de consommation d’eau de l’opérateur de centres de données qu’elle soit cohérente avec le plan local de transition écologique
6. Adapter les plans d’aménagement nationaux à la réalité environnementale, géographique et économique des territoires d’implantation des infrastructures
7. Définir un plan d’aménagement local des infrastructures numériques (zones dédiées, etc.) avec les moyens nécessaires pour leur fonctionnement
8. Privilégier une politique d’open data et ouvrir au maximum toutes les données disponibles permettant de mieux comprendre l’empreinte environnementale des systèmes numériques sur son territoire.
9. Repenser la politique d’achat des équipements électroniques afin de maximiser la durée de vie des équipements
10. Soutenir et renforcer les filières de réparation et de reconditionnement sur son territoire
11. Renforcer la collecte des DEEE avec l’éco-organisme dédié
12. Étudier la possibilité d’investir dans des usines de recyclage de DEEE en prenant en compte les risques financiers et environnementaux

Bibliographie

- ADEME**, « PCAET, comprendre, construire et mettre en œuvre », novembre 2016.
- ADN**, « La Fibre pour tous ! », Ardèche Drôme Numérique, avril 2021, consulté le 6 octobre 2021.
- Andrae**, Anders S. G. et Tomas Edler, « On Global Electricity Usage of Communication Technology: Trends to 2030 », *Challenges* n° 6, 2020.
- Andrae**, Anders S. G., « New perspectives on internet electricity use in 2030 », *Eng. Appl. Sci. Lett.* n° 3, 2020.
- Belkhir**, Lofti et Ahmed Elmeligi, « Assessing ICT global emissions footprint: Trends to 2040 & recommendations », *Journal of Cleaner Production* n° 177, 2018.
- Bernardini**, Oliviero, et Riccardo Galli, « Dematerialization: Long-term trends in the intensity of use of materials and energy », *Futures* 59 n° 4, 1993.
- Bieser**, Jan, et Lorenz Hilty, « Assessing Indirect Environmental Effects of Information and Communication Technology (ICT): A Systematic Literature Review », *Sustainability* 10, 2018.
- Boyd**, Sarah B., « Life-Cycle Assessment of Semiconductors », (Springer: New-York, 2012)
- Carbon Trust**, « The Enablement Effect – The impact of mobile communications technologies on carbon emission reductions », GSMA, 2019
- CLER**, « Porter un projet de territoire en transition – Articuler les démarches méthodologiques », mai 2021.
- Collectif GreenIT**, « Empreinte environnementale du numérique mondial », GreenIT, septembre 2019.
- Collectif GreenIT**, « iNum : Impacts environnementaux du numérique en France », GreenIT, 31 janvier 2020.
- Coroama**, Vlad et al., « A Methodology for Assessing the Environmental Effects Induced by ICT Services – Part I: Single Services », 7th International Conference on ICT for Sustainability (ICT4S2020), 2020.
- Deloitte Touche Tohmatsu Limited**, « Semiconductors – the Next Wave Opportunities and winning strategies for semiconductor companies », Deloitte, 2019.
- Diguet**, Cécile et Fanny Lopez, « Territoires numériques et transition énergétique : les limites de la croissance », rédigé pour la Chaire « Cities and Digital Technology », Sciences Po, 2019
- Durairajan**, Ramakrishnan et al., « Lights Out: Climate Change Risk to Internet Infrastructure », ANRW '18, 2018.
- Ecologic**, « Rapport d'activité 2020 », Ecologic, 2020.
- Ensmenger**, Nathan, « The Environmental History of Computing », *Technology and Culture* 59 n° 4, 2018.
- European Commission**, « Critical Raw Materials Resilience: Charting a Path towards greater Security and Sustainability », European Commission, 9 mars 2020.
- Éveno**, Emmanuel, et Gilles Puel, « Villes et Nouvelle Économie », *Mappemonde* 70, 2003.
- Ferris**, Kathleen et Sarah Porter, « The Myth of Safe-Yield: Pursuing the Goal of Safe-Yield Isn't Saving Our Groundwater », Arizona State University, mai 2021.
- Forti**, Vanessa et al. «The Global E-waste Monitor 2020: Quantities, flows and the circular economy potential », United Nations University (UNU), 2020.
- Freitag**, Charlotte et al., « The real climate and transformative impact of ICT: A critique of estimates, trends, and regulations », *Patterns* 2, n° 9, 2021.
- GeSI et Accenture Strategy**, « SMARTer2030 – ICT Solutions for 21st Century Challenges », GeSI, 2015.
- Graham**, Stephen, « Beyond the 'Dazzling Light': From Dreams of Transcendence to the 'Remediation' of Urban Life: A Research Manifesto », *New Media & Society* 6, n°1, 2004.
- Ipsen**, Kikki Lambrecht, « Environmental assessment of Smart City Solutions using a coupled urban metabolism—life cycle impact assessment approach », *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2018.
- Journal du Grand Paris**, « 180 000 m2 de data centers en Ile-de-France », *Journal du Grand Paris*, 1er décembre 2015.
- Lopez**, Fanny, Maximilian Gawlik et Lisa Gaucher, « Data Centers: Anticipating and planning digital storage », Institut Paris Région, mai 2021.
- Ma**, Rui, « The China tech bubble is bursting. That's not a bad thing for investors », *Rest of World*, 23 août 2021, consulté le 5 octobre 2021
- Magee**, Christopher L., et Tesselano C. Devezas, « A simple extension of dematerialization theory: Incorporation of technical progress and the rebound effect », *Technological Forecasting and Social Change* 117, 2017.
- Malmodin**, Jens et Dag Lundén, « The Energy and Carbon Footprint of the Global ICT and E&M Sectors 2010-2015 », *Sustainability* 10, n° 9, 2018.
- Malmodin**, Jens et Vlad Coroama, « Assessing ICT's enabling effect through case study extrapolation – the example of smart metering », 2016 *Electronics Goes Green 2016+* (EGG), 2016.
- Marquet**, Clement, « Binaire béton : Quand les infrastructures numériques aménagent la ville », Thèse de sociologie, Université Paris-Saclay, 2019.
- Ministère de la Transition Écologique**, « Lignes directrices pour la mise en œuvre sur les territoires des mesures de relance portées par la Ministère de la Transition Écologique », décembre 2020.
- Nova**, Nicolas, Gauthier Roussilhe, « Du low-tech numérique aux numériques situés », *Sciences du Design* 11, 2020.
- Shift Project**, « Lean ICT : pour une sobriété numérique », octobre 2018.

Pei-chi, Liang, Elizabeth Hsu & Matthew Mazzetta, « Water supply to be cut 2 days per week in parts of central Taiwan », Focus Taiwan, 24 mars 2021.

Versteijlen, Marieke et al., « Pros and cons of online education as a measure to reduce carbon emissions in higher education in the Netherlands », Current Opinion in Environmental Sustainability 28, 2017.

Zhong, Raymond & Amy Chang Chien, « Drought in Taiwan Pits Chip Makers Against Farmers », New York Times, 13 avril 2021, consulté le 20 avril 2021

Thoss, Andreas, « EUV lithography revisited », LaserFocus World, 29 août 2019, consulté le 20 avril 2021.

Crédits image

Image de couverture

El Cardenal Cisneros dirigiendo la construcción del Hospital de la Caridad, Alejandro Ferrant, 1892.

Figure 1

Cadre d'analyse des « numériques situés », Gauthier Roussilhe, 2020.

Figure 2

Récapitulatif des estimations de l'empreinte carbone du numérique en 2020 (TV exclus), Charlotte Freitag et al., 2021.

Figure 3

Estimations de l'empreinte carbone du numérique en 2020 ajustées sur le même périmètre (TV et électronique inclus) d'après Freitag et al, Gauthier Roussilhe, 2021

Figure 4

Schéma des dispositifs au service de l'action pour la transition, CLER, 2021.

Figure 5

Enjeux d'implantation de centres de données à Plaine d'après la thèse de Clément Marquet, Gauthier Roussilhe, 2021.

Figure 6

Consommation d'eau de quelques centres de données de Google et Facebook (d'après les données disponibles), Gauthier Roussilhe, 2021.

Figure 7

Site de station 4G alimentée par une génératrice à défaut de raccordement électrique en Ardèche, Gauthier Roussilhe, 2021.

Figure 8

Propositions de l'Institut Paris Région pour penser l'intégration spatiale des centres de données, Institut Paris Région, 2021.

Figure 9

Consommation d'eau des usines de semi-conducteurs à Taïwan en avril 2021, Gauthier Roussilhe, 2021.

