

DÉPLOYER LA SOBRIÉTÉ NUMÉRIQUE

Rapport intermédiaire (V1)
du groupe de travail dirigé par Hugues Ferreboeuf
pour le think tank *The Shift Project*

Janvier 2020 – *The Shift Project*



Étude réalisée avec le
soutien de l'ADEME, de
l'AFD et du groupe AXA.



Avant-propos

The Shift Project, think tank de la transition carbone, a pour vocation de se saisir des enjeux-clés de la transition carbone. Sa mission est d'apporter les éléments factuels et quantitatifs qui permettront d'effectuer les arbitrages nécessaires à la réussite de la transition. Le développement exponentiel du numérique, et la façon dont ce développement peut interagir avec les objectifs de décarbonation de nos sociétés, constitue l'un des angles essentiels de ces enjeux.

The Shift Project a demandé à Hugues Ferreboeuf en avril 2017 de constituer un groupe de travail afin de mener une réflexion collective sur les possibilités de synergie entre transition numérique et transition énergétique. Cette première étape a donné naissance au rapport « Lean ICT – Pour une sobriété numérique » (*The Shift Project*, 2018), publié en octobre 2018 et complété par un second rapport sur les usages vidéos en ligne, « Climat : l'insoutenable usage de la vidéo en ligne » (*The Shift Project*, 2019) publié en juillet 2019. Le travail dont le présent rapport fait état est une troisième étape à ces réflexions, menées par le nouveau groupe de travail réuni par Hugues Ferreboeuf à partir de mars 2019.

L'objectif de l'intégralité de ces travaux est d'identifier les apports essentiels du numérique à la transition énergétique et de les mettre en regard du coût environnemental de leur mise en place pour, à terme, être en mesure de construire des stratégies quantitativement pertinentes et efficaces. Au vu des nombreuses thèses contradictoires circulant sur ces sujets, *The Shift Project* s'investit dans l'effort d'objectivisation des constats, pour en tirer des recommandations pratiques et systémiques en phase avec les objectifs de décarbonation.

Le terme de sobriété numérique possède une longue histoire depuis sa première mention par GreenIT en 2008 (Bordage, F., 2018). Ces deux dernières années, la sobriété numérique s'est construite comme un véritable concept sur la base des consensus scientifiques et techniques produits par les acteurs œuvrant pour un numérique résilient, qui l'appellent de concert.

Nos deux premiers rapports (*The Shift Project*, 2018) (*The Shift Project*, 2019) nous ont permis de définir notre vision du concept de sobriété numérique. Ce troisième volet propose des cadres méthodologiques opérationnels pour la mettre en place : dans les stratégies et politiques publiques, dans l'entreprise, dans les systèmes d'usages du domaine privé.

Ce rapport intermédiaire marque une étape importante dans le processus d'analyse approfondie et de consultation de personnes et institutions impliquées dans ces questions : il présente l'état d'avancement de nos réflexions à ce stade et constitue un support qui nous permettra d'enrichir notre réflexion par les commentaires qu'il suscitera, notamment au cours des Ateliers Collaboratifs « Lean ICT - Déployer la sobriété numérique » du 16 janvier 2020.

Les conclusions et recommandations de notre groupe de travail sont destinées aux acteurs de la vie économique, sociale et politique, et aideront à éclairer les décisions afin d'évoluer vers une société technique résiliente.

Crédit photo de couverture : Filippo Martini, Gian Cescon, Luke Chesser, Malachi Brooks, Markus Spiske, Matthew Kwong, Neonbrand Uq, Rami Al Zayat, Thomas Jensen, Tyler Mullins

A. Remerciements

Hugues Ferreboeuf, directeur du groupe de travail « Déployer la sobriété numérique » pour *The Shift Project*, tient à remercier chaleureusement les experts qui nous ont étroitement accompagnés au sein de notre groupe de travail¹ :

- **Sylvain Baudoin** (Expert, Product Owner en production informatique – Axe 2)
- **Antoine Berthelin** (PartsAdvisor, CTO – Axe 2)
- **Françoise Berthoud** (CNRS, EcoInfo, Ingénieure de recherche experte sur les impacts environnementaux du numérique – Axe 3)
- **Amélie Bohas** (IAE Lyon School of Management - Université Lyon 3, EcoInfo - CNRS, Maître de conférence – Axe 2)
- **David Bol** (Université Catholique de Louvain, Professeur en circuits et systèmes électroniques – Axe 1)
- **Jacques Combaz** (Université de Grenoble | CNRS EcoInfo, Enseignant-Chercheur – Axe 4)
- **Brunie Dayan** (ING, Architecte d'Entreprise – Axe 2)
- **Raphaël Guastavi** (ADEME, Chef de service adjoint du Service Produits et Efficacité Matière – Axe 1)
- **Arnaud Gueguen** (7heures23, Mentor | Darwin-X, Consultant – Axe 2)
- **Philippe Guillouzie** (ADEME, Chef de projet transition numérique – Axe 2)
- **Leticia Iribarren** (Greenflex, Experte Numérique Responsable – Axe 3)
- **Céline Lescop** (AXA, Lead Data Architect – Pilote de l'Axe 2)
- **Jean-Pierre Loisel** (Institut National de la Consommation, Chef du service Communication Education Développement – Axe 3)
- **François Maitre** (Open Group France, Architecte d'Entreprise – Axe 2)
- **Kevin Marquet** (Université de Lyon, INSA Lyon, Inria, CITI | CNRS EcoInfo, Maître de Conférences – Axe 3)
- **Laurie Marraud** (EHESP, Maître de conférence | *The Shift Project*, Cheffe de projet Santé – Copilote de l'Axe 3)
- **Jean-Baptiste Piccirillo** (Rhapsodies Conseil, Consultant en Data Architecture et transformation – Axe 2)
- **Thibault Pirson** (Université Catholique de Louvain, Assistant de recherche (ICTEAM/ECS) – Axe 1)
- **François Richard** (The Shifters, Expert ICT – Axe 2)
- **Laurent Trescartes** (Critical Building, Senior Consultant – Axe 4)
- **Xavier Verne** (SNCF, Ingénieur Digital et enseignant – Axe 2)

Nous remercions chaleureusement l'ensemble de nos autres contributeurs et contributrices pour leurs apports sur la rédaction de l'Axe 2 de nos travaux : **Virginie Bonnell** (Sustainability manager, AXA Group Operations), **Axel Hurgon** (Enterprise Architecture Managing Director, Accenture | The Open Group France) et **Maureen Delaloi** (Senior Data Consultant, Rhapsodies Conseil).

Nous remercions également toute l'équipe du think tank *The Shift Project* pour son soutien, et particulièrement, pour la rédaction et le pilotage de ce rapport : **Maxime Efoui-Hess** (Chargé de Projet, *The Shift Project*) et **Zeynep Kahraman-Clause** (Directrice des Projets, *The Shift Project*).

Le soutien de l'**Agence Française de Développement**, de l'**ADEME** et du groupe **AXA**, qui ont parrainé ce projet et nous ont également permis d'interagir avec leurs équipes, nous a été précieux.

Les interprétations, positions et recommandations figurant dans ce rapport ne peuvent être attribuées ni aux membres du groupe de travail, ni aux relecteurs, ni aux financeurs du projet. Le contenu de ce rapport n'engage que *The Shift Project*.

¹ Axe 1 : « Analyse de projets smart » | Axe 2 : « Réduire l'impact environnemental du Système d'Information » | Axe 3 : « Construction des usages numériques » | Axe 4 : « Scénarios prospectifs »

B. Table des matières

AVANT-PROPOS.....	2
A. Remerciements.....	3
B. Table des matières	4
C. Index des tableaux et des figures	5
D. Indications techniques sur le rapport	7
E. Présentation du think tank <i>The Shift Project</i>	8
F. Enjeux énergie-climat : de quoi parle-t-on ?	8
INTRODUCTION : LE NUMERIQUE, UNE TRANSITION A REPENSER	14
A. Le numérique, à la fois outil et défi pour la transition carbone	14
B. Un numérique aux dynamiques insoutenables	15
C. Pour une sobriété numérique.....	16
D. Objectifs et démarche du groupe de travail	17
I. ANALYSE DE PROJETS « SMART » : EVALUER LEUR PERTINENCE AU SEIN DES « VILLES CONNECTEES ».....	19
A. Contexte et objectifs	19
B. La Smart Light.....	20
C. Quelques cas d'étude : la Smart Light dans une ville connectée.....	21
D. Synthèse des cas d'étude : axes généraux pour étudier la pertinence de la mise en place d'une technologie de type « Smart Light »	28
E. Suite des travaux et pistes de réflexion	28
II. REDUIRE L'IMPACT ENVIRONNEMENTAL DU SYSTEME D'INFORMATION : RELEVER LE DEFI EN DEFINISSANT UNE STRATEGIE INFORMATIQUE ADEQUATE ET EN L'IMPLEMENTANT AVEC DES METHODES STANDARDS.....	29
A. Contexte et objectifs	29
B. Le système d'information a un impact environnemental	30
C. Un modèle de remise en forme du système d'information	31

III. CONSTRUCTION DES USAGES NUMERIQUES : EXPLORER LEURS EFFETS SOCIETAUX ET SUR LA SANTE	41
A. La sobriété numérique : une question d'usages	41
B. Penser les effet délétères des usages numériques dans la vie de l'enfant et de l'adolescent	42
C. Pistes de réflexion.....	46
IV. SCENARIOS PROSPECTIFS : MODELISER LES IMPACTS DES INNOVATIONS MAJEURES	47
A. Observations méthodologiques	47
B. Retour sur les scenarii élaborés en 2018	47
C. Modélisation	51
SYNTHESE ET SUITE DES TRAVAUX	54
A. Suite des travaux.....	54
B. Conclusions générales.....	55
ANNEXES.....	57
A. Annexe 1 • Analyse des projets « smart »	57
BIBLIOGRAPHIE	61
AUTEURS PRINCIPAUX	66

C. Index des tableaux et des figures

Tableaux

<i>Tableau 1 - Données actuellement disponibles quant à l'évaluation de la consommation du système lumineux connecté complet [Source : (IEA, 2016)]</i>	<i>27</i>
<i>Tableau 2 - Impacts du manque de sommeil sur l'individu. Le manque de sommeil chronique entraine une altération du fonctionnement cognitif, émotionnel et sanitaire. [Source : (Desmurget, M., 2019)]</i>	<i>43</i>
<i>Tableau 3 : Consommation d'énergie mondiale du numérique en TWh</i>	<i>48</i>
<i>Tableau 4 - Valeurs retenues pour l'ACV de l'ensemble IKEA [Sources : (IKEA, bulb, 2019) (IKEA, sensor, 2019) (IKEA, bridge, 2019)]</i>	<i>58</i>
<i>Tableau 5 - Valeurs retenues pour l'ACV de l'ensemble IKEA [Sources : (Philips, bulb, 2019) (Philips, sensor, 2019) (Philips, bridge, 2019)].....</i>	<i>59</i>
<i>Tableau 6 - Paramètres utilisés pour obtenir le temps de récupération T_{PB}</i>	<i>60</i>

Figures

Figure 1: Évolution des émissions de CO2 atmosphérique depuis 1850 jusqu'à aujourd'hui, par source (en haut) et évolution de la concentration de CO2 dans l'atmosphère depuis le début de l'ère moderne jusqu'à 2019 (en bas). [Source : Global Carbon budget et Scripps CO2 Program].....	9
Figure 2 : Consommation d'énergie primaire par habitant dans le monde de 1900 à 2015 (hors bois). [Source : TSP data portal et UN statistics division].....	10
Figure 3 - Trajectoires d'émission compatibles avec une hausse de température limitée à 2°C [Source : (The Shift Project, 2016)].....	11
Figure 4: Principaux événements passés de la lutte contre le changement climatique [Source : (The Shift Project, 2019)].....	12
Figure 5 - Distribution de la consommation énergétique du numérique par poste pour la production (45 %) et l'utilisation (55 %) en 2017 [Source: (The Shift Project, 2018)].....	14
Figure 6 - Evolution 2013-2025 de la part du numérique dans les émissions de GES mondiales [Source : (The Shift Project, 2018)].....	15
Figure 7 - Temps d'amortissement TPB pour les trois technologies lumineuses (LED, CFL, INC) et pour trois valeurs de coefficients d'économie d'énergie α (0,15 ; 0,35 ; 0,5) [Source : calculs de The Shift Project].....	23
Figure 8 - Temps d'amortissement TPB pour les trois technologies lumineuses (LED, CFL, INC) et pour trois valeurs de coefficients d'économie d'énergie α (0,15 ; 0,35 ; 0,5), pour un système de 20 ampoules [Source : calculs de The Shift Project].....	24
Figure 9 - Architecture d'un réseau d'éclairage public [Source : Cisco].....	26
Figure 10 - les courbes d'explosion des données autrefois synonymes de croissance deviennent très préoccupantes [Source : (Reinsel, D., Gantz, J., Rydning, J., 2018)].....	30
Figure 11 - Modèle référence – vue de haut niveau – pour une remise en forme du Système d'Information [Source : The Shift Project, Production du groupe de travail].....	31
Figure 12 - Modèle référence – vue de détaillée - pour une remise en forme du Système d'Information [Source : The Shift Project, Production du groupe de travail].....	33
Figure 13 – Risques, responsabilités et rôle de la DSI [Source : The Shift Project, Production du groupe de travail].....	34
Figure 14- Exemples d'objectifs de la vision stratégique du SI soutenable [Source : The Shift Project, Production du groupe de travail].....	35
Figure 15 - Mesurer l'impact environnemental du Système d'Information à différents niveaux [Source : The Shift Project, Production du groupe de travail].....	37
Figure 16 - Une gouvernance du numérique en recherche d'équilibre [Source : The Shift Project].....	38
Figure 17 - La soutenabilité doit être travaillée à la fois en questionnant les usages TOP-DOWN et en mesurant, optimisant les infrastructures BOTTOM-UP [Source : The Shift Project, Production du groupe de travail].....	39
Figure 18 - Intégration des exigences environnementales dans la démarche agile [Source : The Shift Project, Production du groupe de travail].....	40
Figure 19 : Évolution 2013-2025 de la consommation énergétique du numérique en TWh	49
Figure 20 : Évolution 2013-2025 de la part du numérique dans les émissions de GES	49
Figure 21 - Distribution de la consommation énergétique du numérique par poste pour la production (45 %) et l'utilisation (55 %) en 2017 [Source: (The Shift Project, 2018)].....	50
Figure 22 – Parcs (figure de gauche) et ventes (figure de droite) d'objets connectés entre 2010 et 2030 [Source : (EDNA, 2019)]	51
Figure 23 – Evolution vers l'Edge Cloud [Source : (Gartner, 2018)].....	53
Figure 24 – Ensemble « TRÅDFRI » par IKEA [Sources : (IKEA, bulb, 2019) (IKEA, sensor, 2019) (IKEA, bridge, 2019) (iFixIt, 2019) (Teschler, L., 2019)].....	58
Figure 25 - Ensemble « HUE » par Philips [Sources : (Philips, bulb, 2019) (Philips, sensor, 2019) (Philips, bridge, 2019) (ANandTech, 2019)]	59

D. Indications techniques sur le rapport

1. Liste des abréviations

IoT	Internet of Things – Internet des Objets
lm	lumen
IA	Intelligence Artificielle
TPB	Payback time - Temps de récupération, ou d'amortissement
LED	Light Emitting Diodes
CFL	Compact Fluorescent Lamp
INC	Ampoule à incandescence
PUE	Power Usage Effectiveness
EE	Energy Efficiency – Efficacité Energétique
PUE	Analyse de Cycle de Vie
CAGR	Compound Annual Growth Rate

2. Liste des symboles utilisés dans les calculs

α	Coefficient d'économie d'énergie
β	Fraction du nombre d'heures d'utilisation autorisées sur 24h
E	Grandeur « Consommation d'énergie » (en J ou kWh)
P	Grandeur « Puissance » (en W)
X_{bulb}	Grandeur (« E » ou « P ») associée à la partie lumineuse (ampoule) de la lampe connectée
X_{smart}	Grandeur (« E » ou « P ») associée à la couche intelligente (électronique) de la lampe connectée
$X_{embodied}$	Grandeur (« E » ou « P ») associée à la phase de production de la partie concernée
X_{funct}	Grandeur (« E » ou « P ») associée à la phase d'utilisation de la partie concernée
$E_{light,ini}$	Consommation d'énergie initiale de la lampe, i.e. du modèle sans couche connectée

3. Interpréter les références bibliographiques

Les références bibliographiques sont citées dans ce rapport selon un code reprenant l'auteur principal et l'année de publication de la source. La référence (Byeon H. et al., 2015), par exemple, signifie qu'il faut se référer à l'article « Relationship between television viewing and language delay in toddlers » publié dans la revue scientifique PLoS One en 2015 par Byeon H. et al. Les informations complètes sont accessibles dans la bibliographie, classée par auteurs.

4. Votre participation à la relecture du rapport

Ce rapport intermédiaire, qui est déjà le fruit d'un travail collectif, est un document de travail amené à évoluer. Dans cette logique, nous vous prions d'envoyer vos remarques, critiques et propositions à l'adresse mail pilotes-gt-lean-ict@theshiftproject.org, qui regroupe les pilotes des 4 axes du présent rapport (Axe 1 : Maxime Efoui-Hess ; Axe 2 : Céline Lescop ; Axe 3 : Laurie Marraud, Maxime Efoui-Hess ; Axe 4 : Hugues Ferreboeuf). Votre contribution est importante pour nous, et permettra d'enrichir et affiner notre travail.

E. Présentation du think tank *The Shift Project*

The Shift Project est un think tank qui œuvre en faveur d'une économie post-carbone. Association loi 1901 reconnue d'intérêt général et guidée par l'exigence de la rigueur scientifique, sa mission est d'**éclairer et influencer** le débat sur la transition énergétique et climatique en Europe. Éclairer : nous constituons des **groupes de travail** autour des enjeux les plus délicats et les plus décisifs de la transition vers une économie post-carbone ; nous produisons des **analyses** robustes et chiffrées sur les aspects clés de la transition ; nous élaborons des **propositions** innovantes, avec le souci d'apporter des réponses à la bonne échelle. Influencer : nous menons des campagnes de **lobbying** pour promouvoir les recommandations de nos groupes de travail auprès des décideurs politiques et économiques ; nous organisons des **événements** qui favorisent les discussions entre parties prenantes ; nous bâtissons des **partenariats** avec les organisations professionnelles, le monde universitaire et des acteurs internationaux.

Le *Shift* a été fondé en 2010 par plusieurs personnalités du monde de l'entreprise ayant une expérience de l'associatif et du public – dont son actuel président Jean-Marc Jancovici (par ailleurs membre du Haut Conseil pour le climat et associé du cabinet Carbone 4). Le *Shift* est soutenu en 2020 par plusieurs **grandes entreprises** françaises et européennes, ainsi que quelques organismes publics et associations d'entreprises.

Le *Shift* a été créé afin de mobiliser les entreprises et les pouvoirs publics sur les risques, mais surtout sur les opportunités de long terme engendrées par **l'approvisionnement énergétique et le changement climatique** et cela dans une tradition française d'optimisation sous contrainte, où il est essentiel de bien hiérarchiser l'efficacité potentielle des diverses manières de s'attaquer à la question. *The Shift Project* s'adresse avant tout aux décideurs et aux corps intermédiaires.

Depuis sa création, *The Shift Project* a initié **plus de 20 projets d'étude**, participé à l'émergence de 2 manifestations internationales (Business and Climate Summit, World Efficiency), et organisé plus de 60 colloques, forums, ateliers et conférences. Il a pu influencer significativement plusieurs décisions politiques importantes pour la transition énergétique, en France et au sein de l'Union européenne.

La démarche du *Shift* est marquée par un **prisme d'analyse particulier**, fondé sur la conviction que l'énergie est un facteur de premier ordre de développement et que, dès lors, les risques induits par le changement climatique, intimement liés à l'usage de l'énergie, relèvent d'une complexité systémique et transdisciplinaire particulière. Les enjeux climat-énergie conditionnent l'avenir de l'humanité, et il est nécessaire d'intégrer cette dimension le plus rapidement possible à notre modèle de société.

F. Enjeux énergie-climat : de quoi parle-t-on ?²

Les transformations liées aux enjeux énergie-climat d'atténuation et d'adaptation sont marquées par leur ampleur et leur incertitude. Faute de pilotage, ces transformations seront pour partie subies, et pourraient intervenir d'une manière chaotique à travers de ruptures profondes d'ordres technologique, politique, diplomatique, économique et sociale. Celles-ci constituent une menace pour la stabilité du système socio-économique mondial.

1. Un futur incertain, des risques à fort impact potentiel

a. L'énergie, principale clef de la problématique climatique

Les enjeux soulevés par le changement climatique et son impact sur la société n'ont jamais été aussi prégnants. Il existe aujourd'hui un consensus général en ce qui concerne la source de ces bouleversements. C'est l'émission de quantités croissantes de « gaz à effet de serre » (GES) et l'accroissement de leur concentration dans l'atmosphère qui alimentent le réchauffement climatique dans des proportions alarmantes.

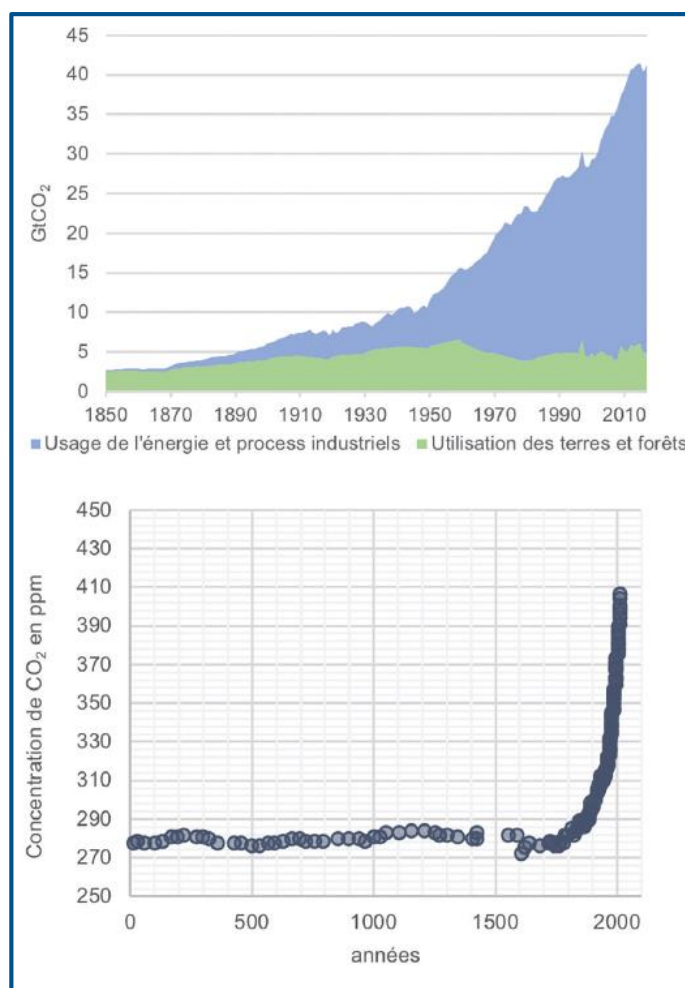
² Ce passage est en grande partie issu d'un précédent rapport du *Shift* publié avec l'Association françaises des entreprises privées (Afepe) : « Scénarios énergie-climat : Évaluation et Mode d'emploi » (2019) p17-20. Il a été mis à jour et complété.

Les conséquences de ce phénomène physique sont connues depuis longtemps : au-delà des découvertes d'Arrhenius qui remontent à la fin du XIX^{ème} siècle, elles suscitaient déjà des inquiétudes scientifiques dès 1953³, de larges préoccupations collectives depuis la fin des années 1960⁴, et de quasi-consensus depuis le sommet de Rio en 1992.

Entre 1876 et 2017, ce sont près de 2 220 GtCO₂ qui ont été rejetées dans l'atmosphère (sur un total de l'ordre de 3 000 GtCO₂, budget qui permettraient de limiter le réchauffement à 2°C) entraînant un réchauffement de l'ordre de 1°C au-dessus des niveaux préindustriels. Si le taux d'augmentation des températures actuel se maintient, le réchauffement planétaire devrait être de l'ordre de 1,5°C d'ici 2040⁵.

Les émissions de CO₂, qui culminent en 2017 à près de 42 milliards de tonnes de CO₂⁶ (hors autres gaz du protocole de Kyoto⁷) peuvent être décomposées en trois catégories :

1. **les émissions énergétiques** (i.e. production de chaleur par combustion) sont les plus importantes et représentent près de 35 GtCO₂/an.
2. **les émissions industrielles non-énergétiques** qui recouvrent les émissions liées aux process industriels (production de ciment⁸, chimie lourde, etc.) et qui représentent de 2 à 3 GtCO₂/an GtCO₂⁹.
3. **les émissions liées à l'occupation des terres** qui représentent près de 5 GtCO₂/an¹⁰.



*Figure 1: Évolution des émissions de CO₂ atmosphérique depuis 1850 jusqu'à aujourd'hui, par source (en haut) et évolution de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère depuis le début de l'ère moderne jusqu'à 2019 (en bas).
[Source : Global Carbon budget et Scripps CO₂ Program]*

Le paramètre « énergétique » a été et demeure un facteur essentiel de développement des sociétés. Par définition, l'énergie est la grandeur physique qui mesure le « changement d'état d'un système ». Autrement dit, lorsqu'un système se transforme, il nécessite l'utilisation d'énergie. La quantité d'énergie mobilisée caractérise le degré de cette transformation. C'est, entre autres, le cas des changements de température, de forme, de vitesse, ou de composition chimique.

Or, en première approximation, une société humaine peut être considérée comme un système qui extrait, transforme, travaille, et déplace des ressources minérales ou biologiques puisées dans l'environnement, afin de produire les biens et les services que les individus consomment pour satisfaire leurs besoins.

³ Voir "Energy in the future" by Palmer Cosslett Putnam, consultant to the United States Atomic Energy Commission, 1953

⁴ Voir "The Historical Roots of Our Ecologic Crisis" by Lynn White, Jr. – Science, 1967 (Lynn White, 1967)

⁵ Voir chapitre 2 du Rapport spécial 1.5°C, GIEC (2018), figure 2.3, p105

⁶ Ibid. p107

⁷ Les 6 gaz du protocole de Kyoto sont : CO₂, CH₄, N₂O, HFCs, PFCs and SF₆

⁸ La calcination du calcaire qui intervient dans le processus de fabrication du clinker (principal constituant du ciment) consiste à transformer du calcaire (carbonate de calcium ou CaCO₃) en chaux (CaO). Elle entraîne chimiquement la formation de CO₂. Les émissions non-énergétiques annuelles de CO₂ associées à la production de ciment s'élevaient en 2010 à 1,4 GtCO₂. Voir le 5^{ème} rapport d'évaluation du GIEC chap10, p749.

⁹ Les émissions annuelles de CO₂ associées aux process industriels (non-énergétiques) s'élevaient en 2010 à 2,6 GtCO₂. Voir le 5^{ème} rapport d'évaluation du GIEC chap10, p.749.

¹⁰ La mesure des émissions de CO₂ liées à l'agriculture ou à l'occupation des sols présente des incertitudes. Elles seraient de l'ordre de 5 GtCO₂/an +/- 2,5. Voir « Global Carbon Budget 2018 », Le Quéré et al. (2018).

Dès lors, la découverte puis l'usage croissant d'énergie primaire¹¹ notamment via des « convertisseurs » capables de la transformer en énergie mécanique (machine à vapeur, moteur à combustion interne, turbines, etc.) – ainsi que l'augmentation de tous les flux physiques qui sous-tendent les activités de production – ont joué un rôle de premier ordre dans l'accroissement de la productivité du travail et dans l'expansion économique, sociale et démographique des sociétés humaines.

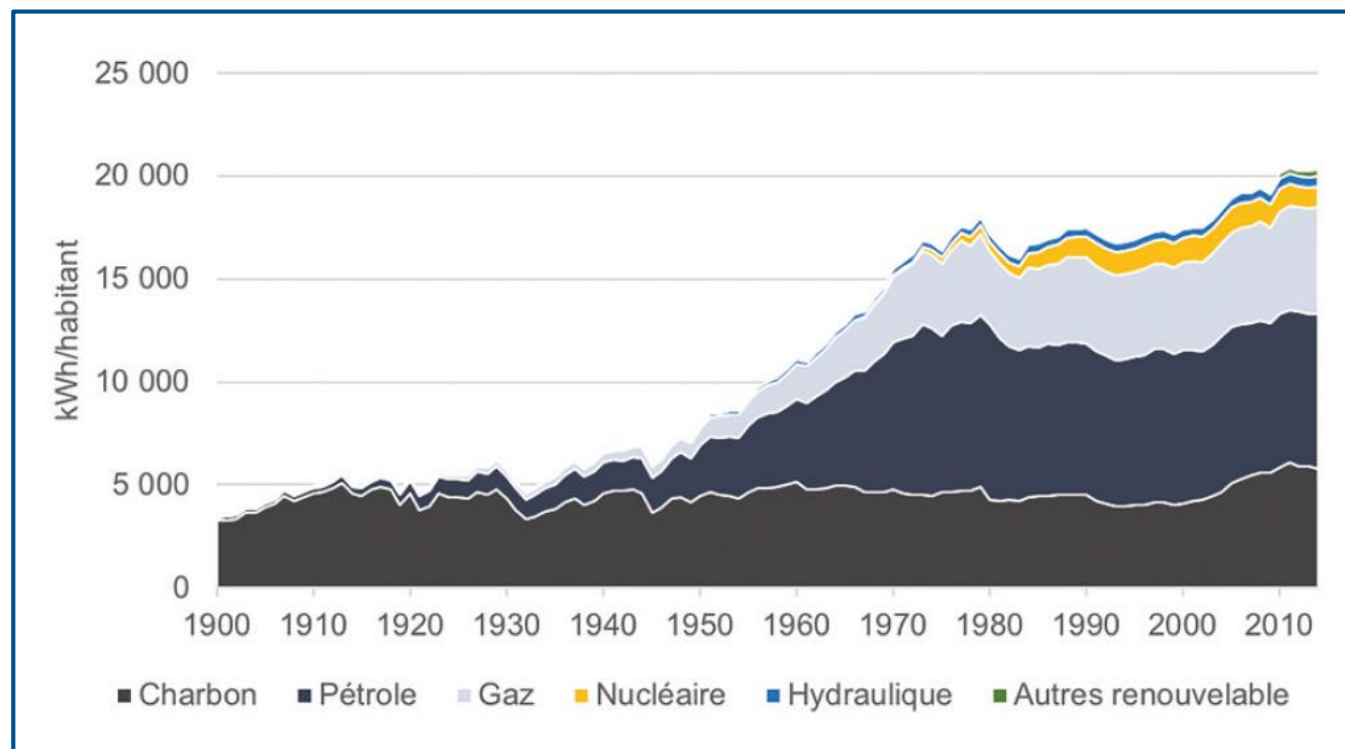


Figure 2 : Consommation d'énergie primaire par habitant dans le monde de 1900 à 2015 (hors bois).
[Source : TSP data portal et UN statistics division]

Cette expansion s'est accélérée mondialement au XIX^{ème} siècle grâce à la découverte puis l'usage massif des énergies fossiles dans tous les secteurs de l'économie, de l'agriculture à l'industrie, en passant par le transport. Au cours de l'année 2016 par exemple, près de 13 760 Mtep d'énergie primaire ont été consommées dans le monde, dont 32% de pétrole, 22% de gaz et 27% de charbon¹².

Depuis près de 200 ans, nos sociétés ont dimensionné leur développement sur une abondance d'énergie inédite d'origine fossile. La production d'électricité, l'activité industrielle (métallurgie, cimenterie et chimie essentiellement), l'aménagement du territoire, le commerce avec le raccourcissement des distances et du temps, l'augmentation des rendements agricoles, mais aussi les avancées sociales (confort matériel, progrès sanitaires, éducation, sécurité, tourisme de masse, etc.), et plus récemment le numérique¹³ ont été rendues possibles par cette abondance.

La problématique climatique relève pour cette raison d'une difficulté et d'une complexité particulières. Elle est intimement liée au recours aux énergies fossiles qui permettent jusqu'ici aux économies modernes de fonctionner et de se développer.

b. Risques de transition et risques physiques

Pour le système économique et ses différents acteurs, les enjeux énergie-climat se manifestent sous la forme de risques de deux natures¹⁴.

¹¹ L'énergie primaire est une forme d'énergie disponible dans la nature avant toute transformation.

¹² Voir IEA statistics. Les mix énergétiques des principales économies du monde sont principalement composés d'hydrocarbures (74% dans l'Union européenne, 81% dans les pays de l'OCDE, 88% en Chine, 92% en Inde et 86% aux Etats-Unis en 2015).

¹³ L'économie dite « dématérialisée » est également fortement consommatrice de ressources transformées, et n'est possible que dans un monde très consommateur d'énergie (The Shift Project, 2018).

¹⁴ Voir notamment le désormais célèbre discours du Gouverneur de la Banque d'Angleterre Mark Carney au Lloyds de septembre 2015.

Les risques de « transition » recouvrent l'ensemble des risques associés à la restructuration profonde du système économique induite par l'évolution du mix énergétique, lui-même contraint par la réduction des émissions de CO₂ dans l'atmosphère. La transition vers un système économique faiblement émetteur de CO₂ implique une transformation profonde du système de **production** et de **consommation d'énergie** (l'appareil industriel et les modes de vie demeurent aujourd'hui dimensionnés sur l'usage des hydrocarbures). Cette transformation devra être rapide (réduction des émissions de gaz à effet de serre de l'ordre de 5 à 10% par an). Elle affectera la plupart des flux physiques (d'énergie, de matières premières, de biens), et concernera directement ou indirectement tous les secteurs de l'économie.

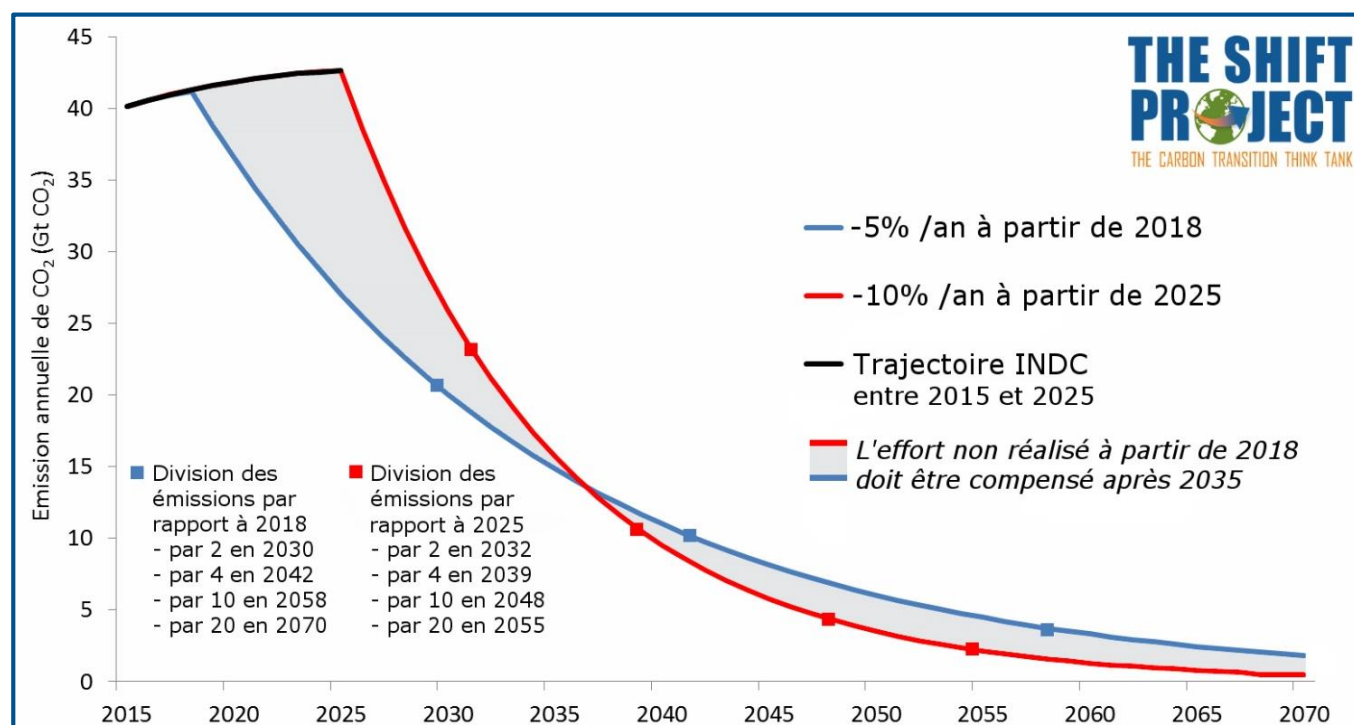


Figure 3 - Trajectoires d'émission compatibles avec une hausse de température limitée à 2°C
[Source : (The Shift Project, 2016)]

Les risques « physiques » sont quant à eux associés aux conséquences physiques du changement climatique, tels que l'accroissement de la fréquence et de l'intensité des aléas climatiques extrêmes, l'élévation du niveau des mers, certains défis à la santé publique ou encore le bouleversement du débit de fleuves. Ces phénomènes pourraient très significativement perturber le système économique, en particulier les activités de production et les chaînes d'approvisionnement. Les récentes tractations autour de l'ouverture de nouvelles routes maritimes dans l'océan Arctique¹⁵ ou encore la faiblesse du niveau du Rhin à l'automne 2018¹⁶, sont des exemples de risques (ou d'opportunités) impliquant les flux de matières et de biens. La matérialité de ce risque est l'objet de travaux de plus en plus nombreux et précis – émanant d'instances scientifiques et politiques internationales, ainsi que désormais de secteurs d'activité tels que celui de l'assurance, ou de certaines industries – tant sur les perspectives d'impacts que sur l'adaptation et la résilience des organisations et des institutions (Etats, entreprises etc.).

Ces risques **se distinguent d'autres types de risques** notamment par les aspects suivants :

- leur caractère inédit, et dès lors l'impossibilité d'utiliser des valeurs historiques pour les prévoir et les appréhender voire valider toute modélisation (back-testing) ;
- leur ampleur et leur caractère global et irréversible (ces risques affecteront d'une manière plus ou moins directe tous les secteurs de l'économie et notamment le secteur financier) ;
- l'incertitude associée à leur horizon d'occurrence, à leur diffusion et à leur manifestation ;
- la dépendance (partielle) de leur ampleur compte tenu des actions décidées dès aujourd'hui.

¹⁵ « Estimation de l'impact des nouvelles routes polaires sur la géographie du commerce mondial » CEPII (oct. 2018).

¹⁶ « Les niveaux d'eau du Rhin deviennent «critiques» pour la navigation et l'industrie ». L'Alsace (31/10/2018). La faible navigabilité du Rhin serait en partie à l'origine du ralentissement économique en Allemagne. Voir "Europe's mightiest river is drying up, most likely causing a recession in Germany. Yes, really.", Business Insider France (22/01/2019).

c. Budget carbone

La mobilisation progressive, résultant de la volonté d'atténuer et de gérer le risque climatique, a abouti à la signature de l'Accord de Paris en décembre 2015. Dans le cadre de cet Accord, les pays signataires se sont engagés à agir afin de contenir l'élévation de la température moyenne de la planète bien en-deçà de 2°C et de poursuivre l'action menée pour limiter l'élévation des températures à 1,5°C. **La limitation du réchauffement climatique bien en deçà des 2°C par rapport à l'époque préindustrielle, est un objectif qui s'est progressivement imposé dans les discussions internationales.**

Compte tenu de la forte relation qui lie le taux de concentration de GES dans l'atmosphère et l'élévation de la température moyenne, la fixation d'une telle limite de réchauffement implique, par construction, l'allocation d'un « **budget carbone** ». Il s'agit de la quantité totale de GES qu'il est possible d'émettre pour maintenir leur concentration dans l'atmosphère en-deçà d'un certain taux correspondant à la limite de réchauffement visée.

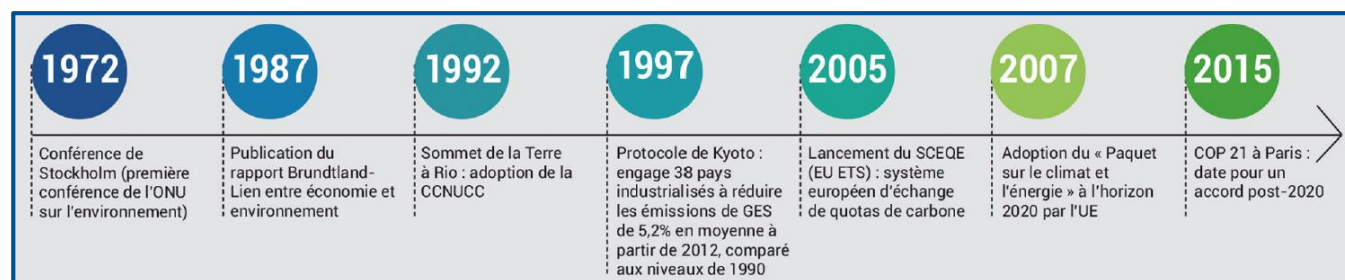


Figure 4: Principaux événements passés de la lutte contre le changement climatique
[Source : (The Shift Project, 2019)]

Les experts du GIEC estiment, dans le rapport spécial 1.5°C (SR15) publié en 2018, que le budget CO2 permettant de maintenir le réchauffement **au-dessous de 2°C avec 66% de chance**, est en 2018 de **1170 GtCO2¹⁷** (1500 GtCO2 pour 50% de chance). Le budget CO2 permettant de maintenir le réchauffement **au-dessous de 1.5°C avec 66% de chance**, est quant à lui, de **420 GtCO2** (580 GtCO2 pour 50% de chance).

2. La transition bas-carbone pourrait être désordonnée et incertaine

La lutte contre le réchauffement climatique se heurte à la « tragédie des horizons¹⁸ ». La matérialité des risques énergie-climat n'est pas encore suffisamment perçue par les acteurs économiques, qui se trouvent confrontés au classique dilemme du prisonnier¹⁹. Cela conduit à retarder l'action favorisant ainsi l'émergence de politiques de réduction d'émissions de GES plus brutales ou radicales à l'avenir (pour compenser le retard).

La réduction de la consommation d'hydrocarbure implique des transformations très lourdes (usage de l'énergie, système productif, aménagement du territoire, etc.). Le système économique actuel a été dimensionné par l'abondance d'hydrocarbures : cette situation entraîne de facto un grand nombre de « dépendances organisationnelles » qui pourraient nécessiter un temps, des ressources et un engagement de la puissance publique considérables pour être levés. Ces dépendances pourraient globalement retarder l'action, et par ailleurs générer des réactions sociales fortes.

La réduction de la consommation de ressources, énergétiques et non-énergétiques, pourrait également se faire de manière chaotique. L'approvisionnement en hydrocarbures est contraint par la disponibilité géologique et la capacité technico-économique à l'exploitation des gisements²⁰. L'approvisionnement

¹⁷ Voir chapitre 2 (table 2.2) du « Rapport spécial 1.5°C », GIEC (2018). Ce budget ne couvre que les émissions de CO2 énergétiques et non-énergétiques, mais son calcul tient compte des émissions des autres GES (principalement méthane et protoxyde d'azote). Voir section 2.2.2.2. p106. Les auteurs précisent que de nombreuses incertitudes sur sa valeur (qui s'élèvent à plusieurs centaines de GtCO2) demeurent.

¹⁸ Cette expression caractérise le décalage entre l'horizon d'occurrence perçu des risques climat et l'horizon de gestion des organisations, notamment financières. Elle est évoquée par Mark Carney, Gouverneur de la Banque d'Angleterre, dans un discours prononcé au Lloyds de Londres en 2015.

¹⁹ Tant que le coût des externalités reste bas, un acteur peut même se causer un « désavantage compétitif » en étant « vertueux trop tôt » par rapport à ses concurrents.

²⁰ Fondamentalement, l'extraction d'une matière disponible en quantité finie passe toujours par un maximum, après-quoi la quantité extraite chaque année se stabilise et/ou décroît. Les hydrocarbures, à commencer par le pétrole, n'échappent pas à la règle. En 2018, le rapport annuel de l'Agence internationale de l'énergie (AIE), le World Energy Outlook (WEO), alertait : "The risk of a supply crunch looms largest in oil. The average level of new conventional crude projects approvals over the last three years is only half the amount necessary to balance the market

en matières premières, et notamment en métaux (cuivre, lithium, nickel, cobalt, etc.) est également contraint à terme (Hache, 2019). Les bouleversements induits par les pertes de biodiversité ou d'autres impacts environnementaux, et les mesures prises pour y faire face, génèrent une complexité et une incertitude supplémentaire.

La dynamique du changement climatique est complexe et sa modélisation demeure marquée par des incertitudes importantes. Si les nombreux travaux des chercheurs du GIEC permettent d'estimer comment le changement climatique pourrait affecter les écosystèmes naturels et humains (groupe de travail n°1 et 2), de telles estimations sont sujettes à des incertitudes (notamment en ce qui concerne la localisation, l'ampleur ou encore la fréquence de ces changements), ce qui complexifie la réalisation de prévisions des manifestations physiques du changement climatique²¹ (Hallegatte, 2009).

Par ailleurs, les conséquences de ces manifestations (et leur diffusion), notamment socio-économiques, sont également difficilement prévisibles. La faillite soudaine de PG&E après les incendies en Californie en 2017 et 2018 est un exemple parmi d'autres²².

L'environnement commercial et géopolitique est en plein bouleversement. Le contexte de guerre tarifaire affectant le commerce international²³ (inimaginable il y a encore trois ans malgré les difficultés qui affectent l'OMC), le Brexit et l'orientation de la politique étrangère de plusieurs Etats (beaucoup moins « multilatérale ») sont autant d'éléments qui pourraient entraver la coopération internationale sur le sujet climat et introduire encore davantage d'incertitudes. La potentielle instauration de taxes carbone aux frontières²⁴, mais aussi les difficultés rencontrées par les gouvernements pour instaurer un signal prix carbone croissant (notamment en France avec l'arrêt du gouvernement sur la poursuite de l'augmentation de la taxe carbone), semblent pointer dans le sens d'un recours croissant des États à des mécanismes de réglementation établis potentiellement brutalement et de manière non-coordonnée avec leurs partenaires²⁵.

Dans le monde numérique apparaissent méfiances et questionnements quant à la centralisation de nombreux services et ressources. Les technologies de l'information sont le nœud d'enjeux commerciaux, géopolitiques, de souveraineté, qui mobilisent l'opinion et les puissances publiques notamment européennes pour questionner le rôle et les responsabilités d'entreprises comme les GAFAM et BATX²⁶. Enfin, les mobilisations sociales en faveur de l'action environnementales et l'accélération de la prise de conscience collective sont également peu prévisibles, même si elles semblent augmenter avec les manifestations des effets du changement climatique et l'émergence de jeunes générations davantage inquiètes pour leur avenir.

out to 2025, given the demand outlook in the New Policies Scenario. US tight oil is unlikely to pick up the slack on its own. Our projections already incorporate a doubling in US tight oil from today to 2025, but it would need more than triple to offset a continued absence of new conventional projects" (AIE (Agence Internationale de l'énergie), 2019). En 2019, des chercheurs de l'IFPEN confirment ce risque : « La probabilité d'un oil crunch est loin d'être nulle » (Hacquard, 2019). Que ce soit d'ici 2025 ou plus tard, la capacité d'approvisionnement du système économique est contraint, à terme.

²¹ Dans les rapports d'évaluation publiés par le GIEC, les rédacteurs adjoignent leurs conclusions de formulation du type « medium evidence » ou « high confidence » etc. Voir par exemple le rapport spécial 1.5°C (2018).

²² PG&E Corp, propriétaire de la plus importante compagnie électrique des Etats-Unis par le nombre de clients, s'est déclarée en faillite en janvier 2019, écrasée par fardeau financier de feux de forêt en 2017 et 2018. Le titre de PG&E était considérée « investissable » par les agences de notation financière jusqu'en novembre 2018, date à partir de laquelle la note de crédit de l'entreprise a été rapidement dégradé jusqu'à son dépôt de bilan. Voir par exemple le site web de Moody's.

²³ Voir « Avis de tempête sur le commerce international : quelle stratégie pour l'Europe », Conseil d'analyse économique (2018)

²⁴ Voir « Initiative pour l'Europe - Discours d'Emmanuel Macron pour une Europe souveraine, unie, démocratique. » (septembre 2017). Voir également « How to design carbon taxes », The Economist (18/08/2018). La proposition est désormais portée par la Présidente de la Commission européenne Ursula von der Leyen.

²⁵ Voir également «The material scenario of potential carbon border taxes», Beyond ratings (juillet 2019) : « To put it simply, the development of carbon border tariffs is a scenario to consider in the fundamental analysis of sovereign and corporate assets. It is, of course, uncertain (as illustrated for example by the recent trade deal between the EU and Mercosur), but it deserves attention as its impacts could be significant for investors. If climate issues are more integrated in trade in the future, there will unavoidably be losers and winners. Such changes could be more or less progressive or non-linear, strong or moderate, but they would be meaningful. »

²⁶ GAFAM : Google, Amazon, Facebook, Apple, Microsoft | BATX : Baidu, Alibaba, Tencent, Xiaomi

Introduction : le numérique, une transition à repenser

A. Le numérique, à la fois outil et défi pour la transition carbone

Les technologies de l'information, aujourd'hui centrales et essentielles dans tous les aspects de nos sociétés, possèdent de fait un rôle crucial dans la transition énergétique de nos économies. Cependant, si ces équipements numériques et les usages qu'ils permettent et promettent semblent être conçus pour relever des défis toujours plus grands, cela ne les affranchit pas d'une réflexion sur leur pertinence. Dans un monde fini, il est important de se souvenir que chaque transformation physique et donc chaque action réclame de l'énergie. Y compris celle d'envoyer une information. Les technologies numériques ne sont ainsi pas des outils virtuels, mais bien des supports matériels d'échanges même si nous n'en percevons pas directement la matérialité.

Les technologies numériques forment un système d'envergure mondiale : les terminaux (smartphones, ordinateurs, tablettes etc.) se connectent entre eux via des infrastructures réseaux (câbles terrestres et sous-marins, antennes de réseaux mobiles, fibres optiques etc.) afin d'échanger des informations stockées et traitées dans les centres de données, cœurs battants de ce système. Or chacun de ces éléments nécessite de l'énergie non seulement pour fonctionner (phase d'utilisation) mais également, avant cela, pour être produit : extraction minière des matières premières, processus industriels puis livraison aux consommateurs et consommatrices nécessitent des ressources conséquentes et non-négligeables.

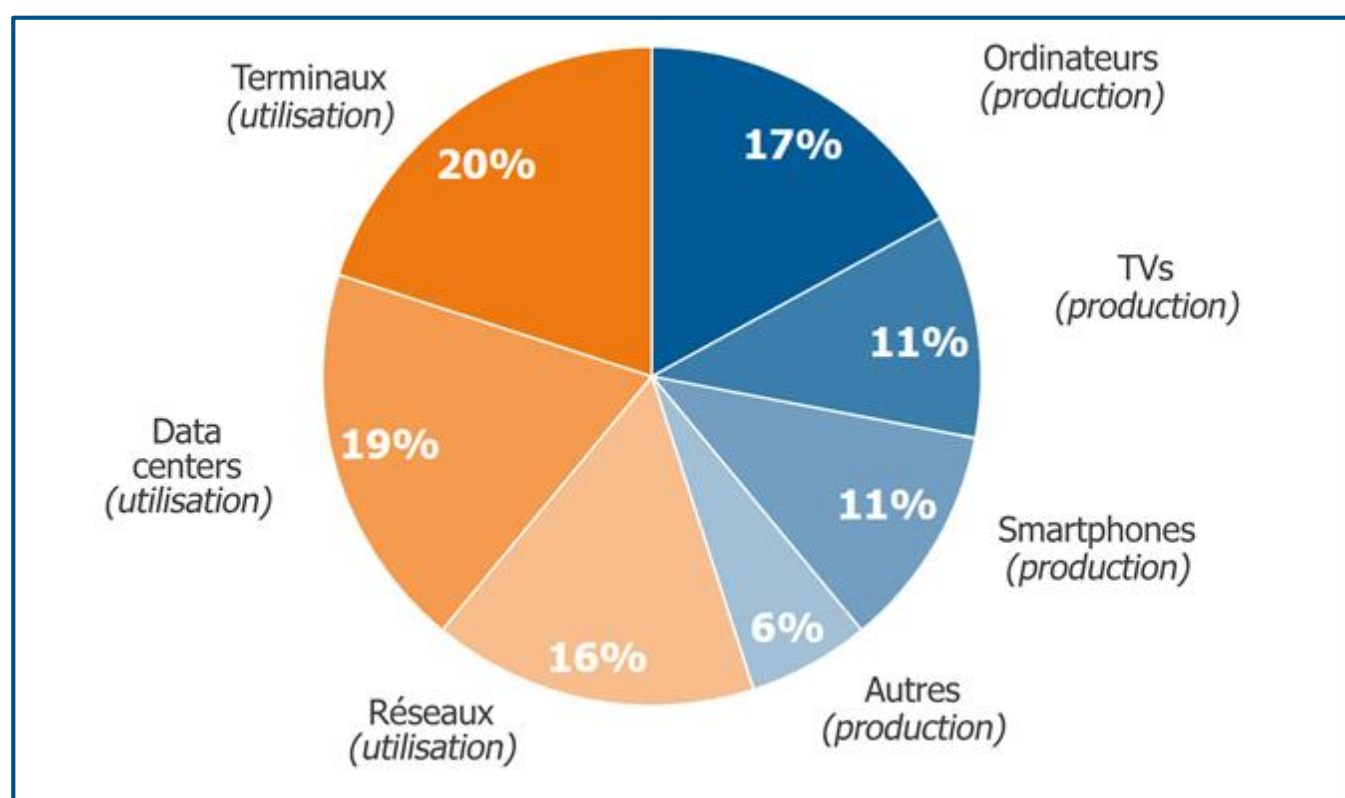


Figure 5 - Distribution de la consommation énergétique du numérique par poste pour la production (45 %) et l'utilisation (55 %) en 2017 [Source: (The Shift Project, 2018)]

Chaque service numérique s'appuie sur des infrastructures physiques et induit donc certaines consommations d'énergie et de matière, elles-mêmes liées à des émissions carbonées. De ce fait, introduire une technologie numérique – même dans le but de diminuer une consommation énergétique, de réduire les émissions de carbone ou d'œuvrer aux transitions d'une quelconque manière – doit faire l'objet d'une réflexion. Car si notre système numérique est un outil à la valeur certaine au vu des défis de ce XXI^{ème} siècle, il reste soumis aux mêmes contraintes physiques (disponibilité énergétique et en ressources minières, contrainte climatique, vulnérabilité des écosystèmes, autres contraintes environnementales) que l'ensemble des systèmes de la planète. Cerné par ces contraintes, le système numérique est en danger. En effet, le caractère physique de ces contraintes les rend non-

négociables, et elles s'appliqueront à nos systèmes qui devront y répondre avec le degré de préparation qu'ils auront alors. A la fois outil crucial et porteuses de défis pour la transition énergétique, nos technologies ont besoin qu'une place leur soit construite avec rigueur et objectivité pour relever au mieux les enjeux de transition.

B. Un numérique aux dynamiques insoutenables

Le numérique tel qu'il est conçu et utilisé aujourd'hui évolue selon des dynamiques qui sont incompatibles avec les contraintes inhérentes à des ressources finies.

En 2019, près de 4 % des émissions carbonées mondiales sont dues à la production et à l'utilisation du système numérique. Cela représente davantage que les 2 % usuellement attribués au transport aérien civil et avec une augmentation qui s'élève aujourd'hui à 8 % par an, cette part pourrait doubler d'ici 2025 pour atteindre 8 % du total – de l'ordre des émissions des voitures et deux-roues actuellement (cf. Figure 6).

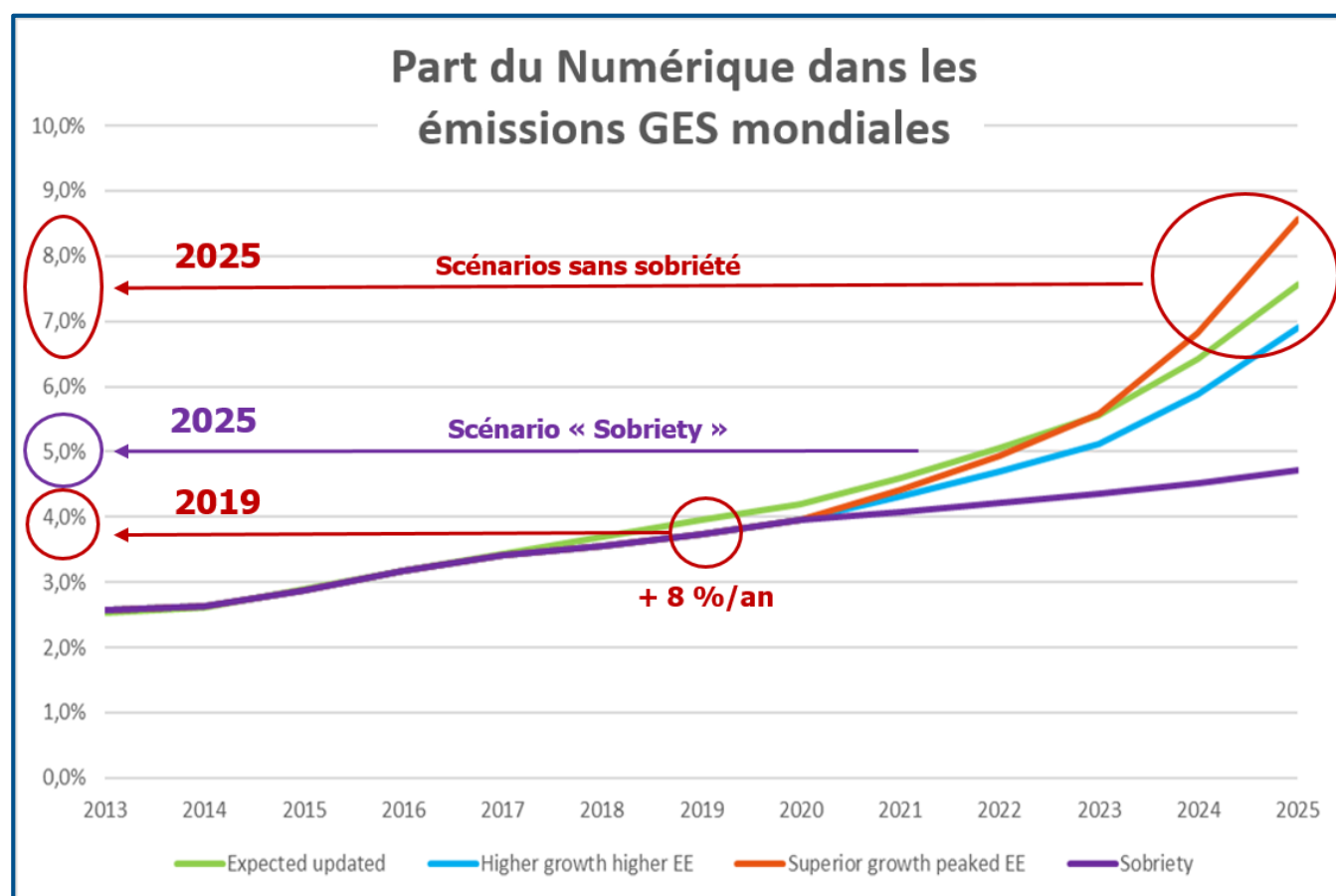


Figure 6 - Evolution 2013-2025 de la part du numérique dans les émissions de GES mondiales
[Source : (The Shift Project, 2018)]

Le respect des accords de Paris, dont l'objectif auto-imposé des 2 °C vise à assurer la résilience de nos systèmes, nécessite d'assurer une diminution des émissions mondiales de 5 % par an (cf. Figure 3). Or, à l'heure qu'il est, nos émissions mondiales continuent d'augmenter malgré la numérisation intensive de nos activités.

Lors de la construction de son premier rapport (The Shift Project, 2018), *The Shift Project* a proposé un scénario « Sobriety », qui démontre qu'il est possible d'infléchir une première fois la dynamique du numérique sans pour autant remettre en cause le principe même de la transition numérique²⁷. Ce scénario permet ainsi de ramener l'augmentation de l'impact du numérique à la tendance globale actuelle tous secteurs confondus²⁸, sans pour autant permettre de rendre la transition numérique compatible avec les accords de Paris.

²⁷ Dans ce scénario, le volume de données transitant dans les centres de données augmente encore de 17 % par an, le trafic sur les réseaux mobiles de 24 % par an, et le nombre de smartphones et téléviseurs produits chaque année se stabilise au niveau de 2017 – alors que les marchés des pays occidentaux sont aujourd'hui proches de la saturation.

²⁸ Ce scénario permet de ramener l'augmentation de la consommation énergétique du numérique à 1,5 % par an.

S'il n'est pas suffisant, il permet cependant de montrer que la trajectoire d'émissions suivie par notre système numérique est très fortement dépendante de la manière dont nous choisissons d'utiliser ces outils, bien plus que de l'avancement technologique lui-même : malgré les avancées technologiques prodigieuses de ces dernières années, une réduction effective de la consommation énergétique totale de nos technologies ne peut se faire à court et moyen termes qu'au travers d'un système d'usages construit et réfléchi. C'est cette réflexion que propose le concept de sobriété numérique.

C. Pour une sobriété numérique

Rendre le numérique compatible avec les contraintes physiques du système climatique implique d'interroger la manière dont nous avons conçu la transition numérique au cours des dernières décennies. Ce que propose la sobriété numérique c'est bien de tirer parti au mieux de l'outil numérique, indispensable si l'on veut relever les défis énergie et climat.

1. La sobriété numérique – son objectif

Ce à quoi la sobriété numérique appelle, c'est à tirer parti de nos capacités d'analyse pour construire un système numérique qui participe à créer un monde dans lequel ses apports sociétaux essentiels sont assurés d'être préservés. Dans un monde fini, cela signifie limiter sa consommation de ressources de façon compatible avec les contraintes environnementales.

2. La sobriété numérique – sa problématique

La question centrale de la réflexion sur la sobriété numérique est celle des usages.

Le système d'usages est intrinsèquement lié à la réalité physique des infrastructures : l'évolution du volume de données entraîne en effet le développement des infrastructures qui les transportent, les traitent et les conservent, permettant ainsi à de nouveaux usages d'apparaître, eux-mêmes plus gourmands en données grâce à cette nouvelle disponibilité. C'est cet automatisme autoalimenté qui régit aujourd'hui l'évolution du système numérique mondial et que la sobriété numérique questionne (The Shift Project, 2018) (The Shift Project, 2019) :

Comment construire notre système d'usages et le système technique qui le sous-tend pour rendre notre système numérique résilient ?

3. La sobriété numérique – un changement de paradigme

La démarche de sobriété numérique consiste à **passer d'un numérique instinctif à un numérique réfléchi**. Il est nécessaire d'identifier les apports sociétaux du numérique à maintenir à tout prix, afin de pouvoir leur allouer en priorité les ressources disponibles.

La question de l'« utilité » d'un apport est bien entendu une question subjective, mais qu'il est nécessaire de poser collectivement²⁹ et de manière explicite, malgré sa complexité, si l'on veut assurer la résilience du système numérique. C'est donc une question qui est, au fond, éminemment politique au sens premier du terme.

²⁹ Les acteurs compétents sur les questions des usages en lignes (organes régulateurs, pouvoirs publics, communautés de designers, plateformes de diffusion de contenus en ligne, groupement de consommateurs etc.) existent déjà au niveau national et international. Les convoquer au sein d'une réflexion sur les usages est possible et indispensable (The Shift Project, 2019).

D. Objectifs et démarche du groupe de travail

1. Les objectifs du projet

L'objectif de cette étude est d'explorer les questions qui sont soulevées lorsqu'il s'agit de mettre en pratique la sobriété numérique. Notre premier rapport, « Lean ICT – Pour une sobriété numérique » (The Shift Project, 2018), a permis de dresser les constats quantitatifs indispensables pour comprendre et caractériser l'impact environnemental du numérique. Notre second rapport, « Climat : l'insoutenable usage de la vidéo en ligne » (The Shift Project, 2019), a commencé à identifier les questions indispensables à la réalisation d'un système d'usages sobre opérationnel.

Le groupe de travail vise désormais à proposer une batterie de constats qualitatifs et quantitatifs, de cadres méthodologiques et de réflexions qui facilitent la mise en œuvre du principe de sobriété numérique par les acteurs et les influenceurs de l'écosystème numérique que sont le grand public, les entreprises, les collectivités publiques et l'État.

a. Axe 1 : évaluer et renforcer la pertinence environnementale des projets numériques au sein des villes connectées

Le concept de « ville connectée », « ville intelligente », ou bien « Smart City », regroupe aujourd'hui de nombreuses réalités et ambitions différentes. A la fois mot d'ordre de politiques publiques et engouement du secteur privé, la ville connectée ambitionne de s'inscrire dans un futur qu'elle peine souvent à caractériser.

L'un des objectifs de ce rapport est de construire un cadre méthodologique illustré par des exemples concrets qui permette aux acteurs stratégiques de la ville connectée (acteurs de politiques publiques, entreprises en transformation numérique, autres acteurs privés) d'évaluer la pertinence environnementale de leurs projets numériques, en les aidant notamment à différencier le bon grain de l'ivraie.

b. Axe 2 : piloter la transformation numérique d'une organisation pour rendre son système informatique soutenable

L'intégralité des organisations (entreprises, associations, institutions etc.) ont recours aux outils numériques dans leurs activités. Leurs stratégies de développement, d'optimisation ou de transformation s'appuient massivement sur des projets numériques sans qu'il y ait généralement de mesure ou d'évaluation prévisionnelle de leur empreinte environnementale.

L'un des objectifs de ce rapport est de proposer un cadre méthodologique qui s'intègre dans les processus de décision existants de l'entreprise (notamment au moyen des référentiels d'Architecture d'Entreprise) et qui permette d'accélérer la mesure et la réduction de l'empreinte environnementale du système d'information d'une organisation, afin d'assurer sa soutenabilité et la résilience des activités qui y sont liées.

c. Axe 3 : explorer et comprendre les articulations entre usages humains et outils numériques

Les infrastructures et équipement numériques sous-tendent un système d'usages qui les justifient. Mettre en place une sobriété numérique en pratique implique donc de comprendre comment ces deux composantes du système numérique, « technologies » et « usages humains », interagissent.

L'un des objectifs de ce rapport est de construire une vision factuelle des mécanismes de construction de nos usages numériques actuels ainsi que de leurs effets. Cela permettra de soulever certaines questions sociétales indispensables à traiter pour discuter d'une sobriété numérique en pratique, d'identifier des leviers de modification de nos systèmes d'usages et de nourrir des politiques publiques facilitant la mise en œuvre de la sobriété numérique.

d. Axe 4 : fournir un éclairage prospectif des conséquences de choix technologiques majeurs

Notre premier rapport (The Shift Project, 2018) dressait une première vision des évolutions possibles de la consommation énergétique et des émissions carbone associées à la production et l'utilisation des technologies numériques.

L'un des objectifs de ce nouveau rapport est de mettre à jour ces scénarios sur la base de données actualisées, ainsi que de prendre en compte certains phénomènes désormais suffisamment documentés pour être abordés et modélisés (IoT³⁰, Big Data, Intelligence Artificielle etc.).

2. La démarche du groupe de travail

Le groupe de travail « Déployer la sobriété numérique » réunit 27 personnes, issues du milieu universitaire, d'entreprises du secteur, du milieu associatif et des différentes sphères expertes des problématiques traitées. Au travers de réunions régulières, de travaux collaboratifs et d'interviews d'acteurs et experts extérieurs depuis mars 2019, ses membres ont pu produire les modélisations, analyses, conclusions et recommandations qui sont réunies dans ce rapport en leur état intermédiaire.

Ce groupe de travail s'est organisé en quatre grands axes, qui structurent les réflexions et les objectifs de ce rapport : la ville connectée, la stratégie numérique des organisations, la question des usages et la modélisation des futurs possibles du système numérique.

³⁰ « Internet of Things », ou « Internet des Objets » en français.

I. Analyse de projets « smart » : évaluer leur pertinence au sein des « villes connectées »

A. Contexte et objectifs

1. Appliquer la sobriété numérique dans le déploiement des technologies innovantes

La « ville connectée », la « ville intelligente », ou bien la « Smart City » : à la fois mot d'ordre de politiques publiques et engouement du secteur privé, la ville connectée regroupe aujourd'hui de nombreuses réalités et ambitions différentes.

Fortement répandu au sein des stratégies territoriales, le concept de ville intelligente est l'une des deux injonctions principales des collectivités aujourd'hui : la stratégie de la ville du futur, c'est une stratégie qui traite de transition numérique d'une part et de transition environnementale d'autre part. Or ces dynamiques deviennent concurrentes et contraires si l'effort de conception et d'évaluation quantitative n'est pas fait avec une rigueur et une envergure suffisante.

La ville intelligente appelle donc bien davantage que la mise en place d'une superposition de services et d'infrastructures connectées. Une ville intelligente est une ville qui saura comprendre les implications des technologies auxquelles elle recourt. Elle sera capable d'identifier les variables à mesurer et ajuster pour s'assurer que sa numérisation soit avant tout compatible avec les contraintes naturelles, mais ensuite et surtout un atout quantitatif pour sa stratégie de transition environnementale.

Pour construire une ville numérique viable et résiliente, il est nécessaire d'évaluer systématiquement la pertinence énergétique et carbone d'une technologie ou d'un service avant leur mise en place. Il est nécessaire de conditionner le déploiement d'une solution numérique à l'évaluation quantitative de son apport quant à la réduction de la consommation énergétique. L'ajout d'une couche intelligente à un service ou à une activité engendre en effet des consommations et émissions indirectes ou contre-intuitives (lors de la phase de production ou des phases de veille, par exemple) qu'il est nécessaire de prendre en considération chiffrée pour assurer la résilience de la ville et de ses composantes.

2. Caractériser les conditions de pertinence d'une technologie « Smart »

L'objectif est d'établir un cadre méthodologique qui permette d'effectuer le bilan énergétique net des infrastructures connectées, aussi dites « intelligentes » ou « smart ».

L'ajout d'une couche intelligente dans une infrastructure engendre la délégation de sa gestion à des microcontrôleurs via l'introduction d'électronique, de capteurs, de dispositifs de communication entre eux ainsi que d'algorithmes de prise de décision et d'optimisation. Bien que les gains énergétiques directs permis par l'introduction de la couche connectée soient souvent quantifiés, deux dimensions essentielles sont occultées :

- Il n'existe que très rarement de quantification de l'énergie grise³¹ et de l'énergie consommée par la couche intelligente elle-même,
- Les conséquences des « effets rebonds³² » sont rarement étudiés et difficilement modélisables.

Il est pourtant fondamental d'être en mesure de quantifier le coût énergétique global et total de la technologie et du système dans lequel elle s'inscrit, de leur production à leur mise en place : c'est bien la mise en regard du coût

³¹ Consommation d'énergie due à la phase de production (extraction des matières premières, production des composants et du produit fini et livraison aux points de vente), en amont de la phase d'utilisation.

³² Le terme « effet rebond » désigne le phénomène historiquement observé selon lequel une amélioration de l'efficacité (en termes de consommation de ressources) d'une technologie ou d'un service entraîne l'augmentation de son usage jusqu'à contrebalancer les économies directes qui avait été permises, pour aboutir à une augmentation de la consommation totale nette de ressources.

énergétique et carbone total avec la réduction permise par la technologie qui permet d'en évaluer la pertinence de manière exhaustive.

Ce travail vise ainsi à produire un cadre méthodologique et certains exemples d'application qui permettent aux acteurs de la ville connectée d'évaluer l'empreinte énergétique d'une technologie connectée et ses apports en termes de réduction des consommations et émissions. Ceci afin de calibrer leurs stratégies d'infrastructures connectées avec une pertinence démontrée et vérifiable.

B. La Smart Light

1. La Smart Light : description de l'objet d'étude

Les systèmes considérés dans cette étude sont les systèmes d'éclairage constitués d'une ou plusieurs ampoules, d'une couche connectée (capteurs et contrôleurs permettant le comportement automatisé et intelligent) et du système de récupération et de traitement des données dans lequel elle s'insère (qui peut rester local ou recourir à des technologies de type cloud).

La « smart light », « ampoule connectée », « lumière connectée », ou « éclairage intelligent » désignent une infrastructure technologique composée de trois éléments (ANandTech, 2019) :

- Une ampoule connectée (« smart bulb »),
- Un capteur de présence connecté (« smart sensor »),
- Un contrôleur pilotant le lien entre les capteurs et ampoules (« HUB », ou « bridge », ou « pont »).

Notre étude s'intéresse aux technologies ayant pour vocation de déléguer la gestion de l'infrastructure à un microcontrôleur et aux outils qui permettent une simple gestion à distance de l'éclairage par l'utilisateur ou l'utilisatrice.

2. Hypothèses et formalisation

a. Hypothèses

- Dans la quantification de l'impact de la phase de production, le circuit imprimé n'est considéré que dans les cas du « HUB ». Pour les autres composantes de la couche intelligente, seules les puces électroniques ont été considérées. La quantification de l'énergie embarquée dans ces puces donnant lieu à d'importantes incertitudes, il est important de considérer des microprocesseurs utilisés pour l'IoT (relativement simple, communication BLE/ZigBee, simple cœur etc.) et d'éviter les microprocesseurs utilisés dans des applications beaucoup plus conséquentes³³.
- Les résultats présentés ci-après ne prennent pas en compte la phase d'extraction des métaux, de par le périmètre des données réunies à ce stade. Cependant, au vu de l'importance de cette phase dans le bilan énergétique total des équipements numériques, combler ce manque est l'un des objectifs des travaux à venir.
- La phase de fin de vie n'est pas prise en compte : en cohérence avec les méthodologies adoptées dans nos précédents travaux (The Shift Project, 2018) et au vu des données disponibles, ne sont considérées que les phases de production et d'utilisation des équipements.
- Dans les données réunies jusqu'ici, l'énergie liée au transport est négligeable par rapport aux phases d'extraction de matières premières et de production (DesignLifeCycle)³⁴.
- Pour la phase d'utilisation, trois cas sont considérés :

³³ Trois cas sont considérés quant à l'impact de production des puces électroniques, selon leur taille/caractéristiques : cf. annexe « 0.A.3. Paramètres utilisés pour l'analyse de la fonction de coût $G(t)$ »

³⁴ Ce résultat est sensible aux hypothèses adoptées quant aux modes et modalités de transport.

- Un cas « limite basse » : on considère que la couche connectée est en veille 100 % du temps (seule la puissance en mode veille est considérée).
- Un cas « moyen » : on considère que la couche connectée est en activité 1 % du temps et en veille 99 % du temps (Bol, D. et al., 2011).
- Un cas « limite haute » : on considère que la couche connectée est en activité 10 % du temps et en veille 90 % du temps.

b. Formalisation mathématique de la pertinence énergétique

Afin de pouvoir évaluer la pertinence de l'introduction d'une couche smart dans un environnement, une fonction de coût global $G(t)$ peut être définie (adapté de (Kumar T., 2017))³⁵ :

$$G(t) = E_{light,savings}(t) - E_{smart}(t) - E_{bulb,embodied}(t)$$

Cette fonction évalue, en fonction du temps, le gain énergétique global réalisé en tenant compte :

- De la diminution de consommation énergétique permise par l'introduction de la couche smart (meilleure gestion de l'infrastructure) – cette diminution est proportionnelle à la consommation énergétique initiale du système d'éclairage :

$$E_{light,savings}(t) = E_{light,ini}(t) \cdot \alpha$$

, où α est appelé « coefficient d'économie d'énergie ».

- De l'énergie de fonctionnement ainsi que de l'énergie grise nécessaire pour produire les différents éléments de cette couche smart :

$$E_{smart}(t) = E_{smart,embodied} + E_{smart,funct}(t)$$

- De l'énergie embarquée dans l'ampoule en elle-même (sans la couche smart) rapportée à la durée de vie et d'utilisation de l'ampoule :

$$E_{bulb,embodied}(t) = E_{bulb,embodied} \cdot \frac{1}{T_{lifebulb}} \cdot t$$

L'analyse de cette fonction permet d'obtenir le point dit de neutralité énergétique, qui correspond au temps d'amortissement, ou temps de récupération, à partir duquel les économies permises par l'introduction de la couche intelligente compensent le coût énergétique de sa production et de son exploitation.

Ce point de neutralité énergétique est défini par $G(T_{PB}) = 0$, où T_{PB} ³⁶ est le temps de récupération (i.e. « *payback time* ») mentionné précédemment. Par conséquent, plus la valeur de T_{PB} est faible plus il est intéressant d'introduire une couche smart dans l'environnement considéré.

C. Quelques cas d'étude : la Smart Light dans une ville connectée

1. Méthodologie : l'approche par cas d'étude

Il s'agit donc de définir un objet d'étude théorique, une « Smart City » caractérisée par un jeu d'hypothèses, puis d'étudier les conditions de pertinence des technologies connectées dans ce contexte.

Les cas d'étude ici présentés visent à servir de support à la construction d'un cadre méthodologique. En raisonnant sur plusieurs cas concrets, l'objectif est d'extraire certains principes généraux qui permettront de construire un jeu

³⁵ Les détails des calculs et de la formalisation sont disponibles en annexe, « 0.A.1 Formalisation mathématique de la pertinence énergétique (détails de calcul) »

³⁶ Expression mathématique de T_{PB} disponible en Annexe : ibid.

de lignes directrices sur lesquelles les acteurs de politiques publiques et les acteurs privés pourront s'appuyer pour bâtir leurs démarches opérationnelles.

Deux types de cas d'études sont exploités dans ces travaux :

- **Des cas d'études théoriques** : caractérisés par des jeux d'hypothèses précisément définies, ils permettront de mettre en évidence les dimensions essentielles à prendre en compte ;
- **Des retours d'expériences** sur la conception et la mise en place d'une stratégie « ville intelligente » : issus d'expériences réelles et des retours d'experts du secteur, ils permettront de confronter nos conclusions théoriques à des situations observées.

2. Cas d'étude n°1 : le salon, le bureau de travail

a. Caractérisation du cas d'étude

Description générale

Ce cas d'étude est un cas d'étude théorique. Il décrit une situation dans laquelle une pièce de vie, professionnelle (type bureaux, salle de travail) ou privée (type salon d'une maison particulière), est dotée d'un système d'éclairage intelligent.

L'objectif est de quantifier, via une modélisation s'appuyant sur la fonction de coût $G(t)$ présentée précédemment (cf. « B.2.b. Formalisation mathématique de la pertinence énergétique »), les conditions sous lesquelles l'introduction de cette couche connectée dans le système d'éclairage mène bien à une réduction de la consommation d'énergie totale – c'est-à-dire en prenant notamment en compte la phase de production et la consommation additionnelle due à l'introduction d'une couche connectée dans le système.

Les résultats présentés dans cette version intermédiaire du rapport se concentrent sur l'évaluation du temps d'amortissement T_{PB} selon la technologie considérée et se basent sur les produits actuellement en circulation dans le marché grand public. L'objectif est ici de caractériser la pertinence énergétique des technologies considérées, première condition nécessaire à l'intérêt de leur mise en place : si l'introduction des couches intelligentes vise à assurer une diminution de la consommation d'énergie, il convient de vérifier que cet objectif est avant tout bien rempli. Pour avoir une démarche complète et rigoureuse, il faudra cependant étendre l'analyse aux impacts non-énergétiques (pollution des sols, eau, matières minières etc.) des technologies dont la pertinence énergétique aura été démontrée.

Variables d'intérêt

Les variables qui permettent de caractériser les dimensions-clés de ce cas d'étude sont les suivantes :

- **Superficie et ratio d'éclairement** : l'ordre de grandeur recommandé – qui varie en fonction de la pièce – est considéré à une valeur moyenne de 50 lm/m^2 (ArchDaily, 2019).
- **Taux d'occupation/fréquentation de la salle** : fréquent (jusqu'à 10h par jour) et régulier (tous les jours).
- **Type de technologie lumineuse** : comparaison pour les ampoules LED, CFL et INC³⁷.
- **Type de technologie pour la couche connectée** : technologies basées sur deux modèles du marché³⁸
 - Ensemble « TRÅDFRI » par IKEA (IKEA, bulb, 2019) (IKEA, sensor, 2019) (IKEA, bridge, 2019) : Ampoule LED E27 806 lumen, pont associé, détecteur de mouvement connecté associé.
 - Ensemble « HUE » par Philips (Philips, bulb, 2019) (Philips, sensor, 2019) (Philips, bridge, 2019) : Ampoule individuelle E14, pont associé, détecteur de mouvement connecté associé.

³⁷ LED : Light Emitting Diodes | CFL : Compact Fluorescent Lamp | INC : ampoule à incandescence

³⁸ Les détails sur les modèles considérés sont disponible en annexe, « 0.A.2. Technologies considérées dans le cas d'étude n°1 »

• Infrastructure de connexion :

- Le système considéré suppose que l'échange de données reste local (asservissement domotique centralisé). L'impact d'une connexion réseau avec le *cloud* ou une infrastructure extérieure (smartphone, ...) n'est pas considéré.
- Le système étudié repose sur une infrastructure à basse bande passante (si l'on considère un système qui traite des données vidéo, par exemple, d'autres réalités seraient à considérer).

b. Analyses et conclusions

Par l'analyse de la fonction de coût $G(t)$ et l'intégration des variables correspondant aux différentes technologies considérées, il est possible d'obtenir une approximation du temps d'amortissement T_{PB} pour les trois technologies lumineuses les plus couramment utilisées (LED, CFL, INC).

La Figure 7 propose une visualisation de ces résultats pour un système comportant une ampoule, un capteur de mouvement et un pont :

- Elle représente le temps d'amortissement pour les trois technologies de luminaires (LED, CFL, INC) et selon trois valeurs du coefficient d'économie d'énergie.
- Les incertitudes sont matérialisées par la barre noire. La borne inférieure de la barre d'incertitude correspond à la valeur minimale que prend T_{PB} suivant les valeurs considérées pour les paramètres, et réciproquement pour la borne supérieure.
- Lorsque la valeur est supérieure à 10^2 années (100 ans), on considère qu'il est impossible de rentabiliser l'introduction de la couche connectée sur la durée de vie de l'ampoule.

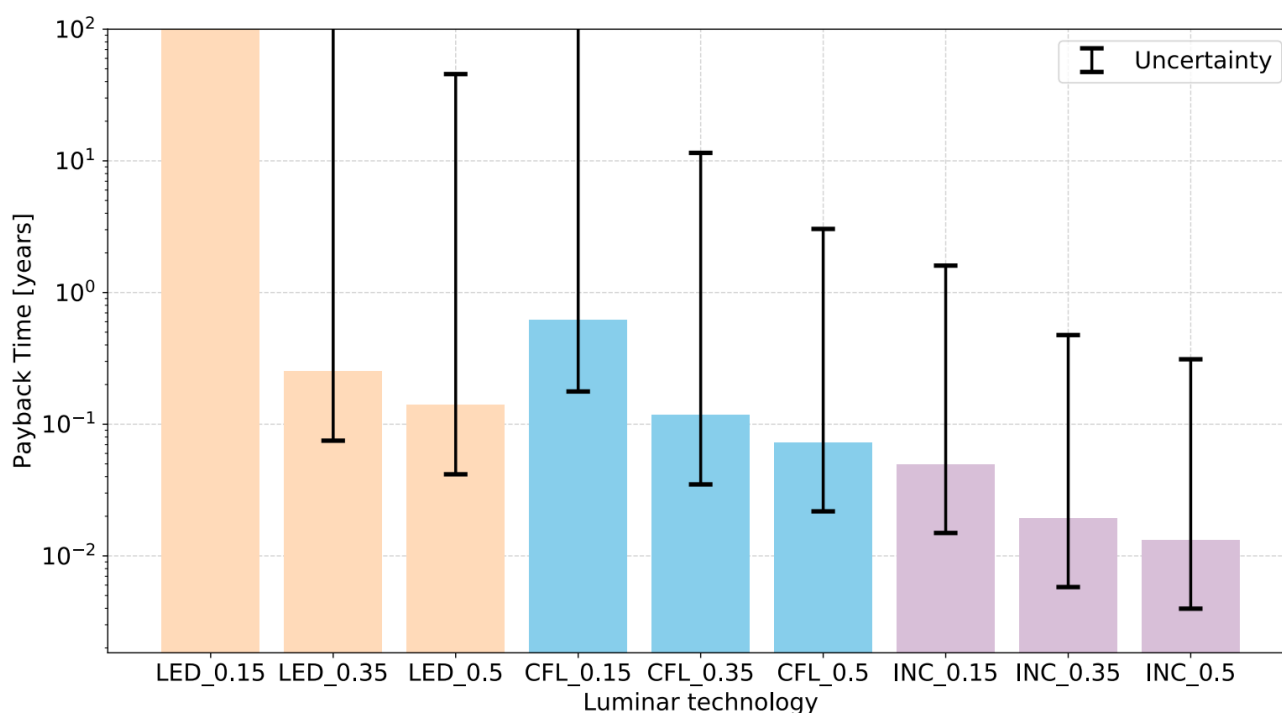


Figure 7 - Temps d'amortissement T_{PB} pour les trois technologies lumineuses (LED, CFL, INC) et pour trois valeurs de coefficients d'économie d'énergie α (0,15 ; 0,35 ; 0,5)
[Source : calculs de The Shift Project]

Les fortes incertitudes sur le temps d'amortissement résultent notamment de celles quant à l'évaluation de la consommation d'énergie due à la phase de production : en considérant une valeur de 1,43 MJ pour la production du système complet (ampoule, pont et détecteur de mouvement)³⁹, le temps de récupération pour les différentes

³⁹ cf. annexe « 0.A.3. Paramètres utilisés pour l'analyse de la fonction de coût $G(t)$ »

technologies est inférieur à une année (hormis pour le coefficient d'économie d'énergie $\alpha = 0,15$ pour lequel il est impossible de rentabiliser la couche smart). En considérant cependant une énergie grise légèrement plus réaliste pour la couche smart (5,11 MJ à 106,11 MJ)⁴⁰, la pertinence de la couche connectée pour la technologie LED baisse drastiquement, puisqu'elle ne devient rentable qu'entre 10 ans et plus de 100 ans.

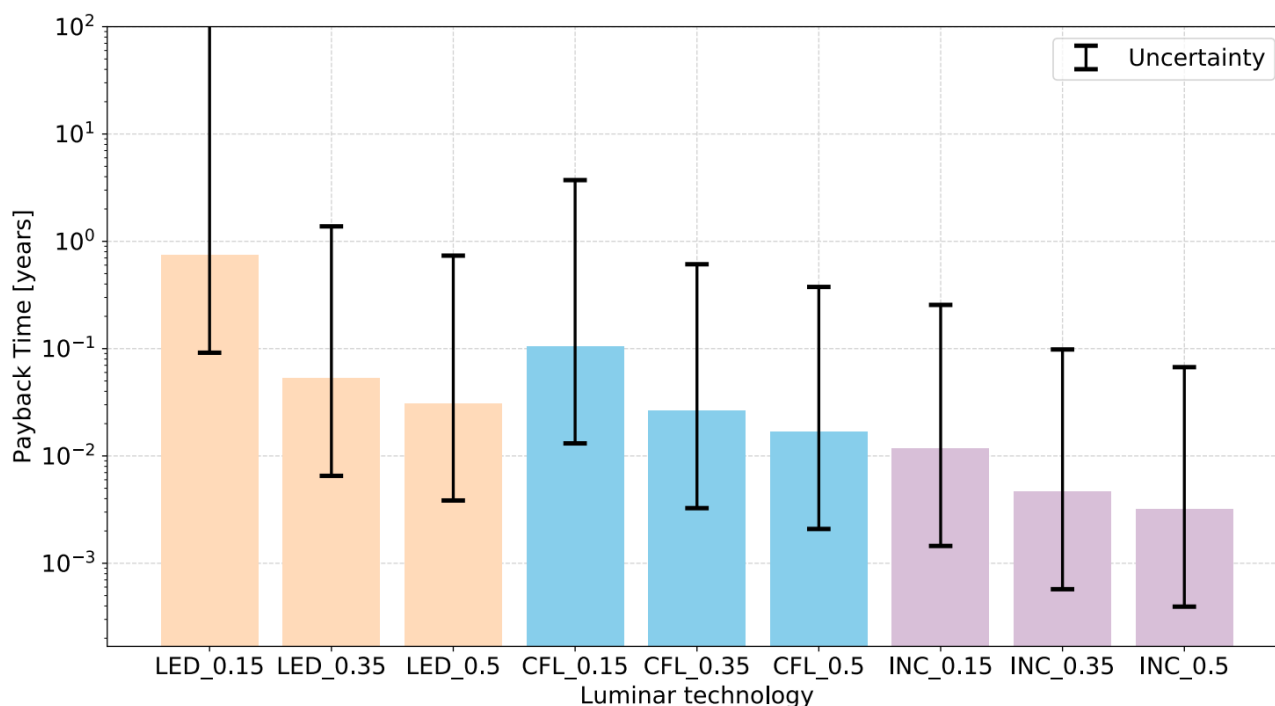


Figure 8 - Temps d'amortissement TPB pour les trois technologies lumineuses (LED, CFL, INC) et pour trois valeurs de coefficients d'économie d'énergie α (0,15 ; 0,35 ; 0,5), pour un système de 20 ampoules
[Source : calculs de The Shift Project]

Afin de se rapprocher du cas d'étude souhaité (cf. « C.2.a. Caractérisation du cas d'étude »), il est pertinent d'élargir ces analyses à un système de plusieurs ampoules. Les résultats de cette modélisation sont représentés Figure 8, pour un système constitué d'un groupe de 20 ampoules connectées et de l'infrastructure associée (1 pont, 1 capteur)⁴¹. Apparaît une nette amélioration globale du temps d'amortissement, venant notamment de l'effet multiplicateur d'une accumulation des coefficients d'économie d'énergie. Il sera pertinent de mettre ce type de dynamiques en regard des paramètres entrant en jeu (nombre de ponts, nombre de capteurs, type de données acquises etc.) et de leurs liens avec la conformation du système.

A ce stade, il est donc possible d'affirmer que la pertinence de l'ajout d'une couche smart dans un système lumineux n'est pas systématique (notamment dans le cas d'ampoules à forte efficacité énergétique comme les ampoules LED), mais qu'une réflexion quantitative peut permettre d'extraire les conformations qui rendent le système pertinent **dans son ensemble**. Un travail de consolidation des valeurs des paramètres, notamment pour l'énergie grise, est cependant indispensable au vu de la sensibilité des conclusions à leurs incertitudes.

3. Cas d'étude n°2 : l'éclairage public

a. Caractérisation du cas d'étude

Contexte et description générale : la smart light dans une infrastructure publique connectée

L'éclairage dans sa globalité représente 19 % de la consommation d'électricité mondiale et 14 % de la consommation d'électricité en Europe (IEE, 2007).

En France, il représente 12 % de la consommation d'électricité nationale, soit 56 TWh (AFE, 2018).

⁴⁰ cf. annexe « 0.A.3. Paramètres utilisés pour l'analyse de la fonction de coût $G(t)$ »

⁴¹ Le pont est réellement le cœur du système. Il est unique dans la majorité des infrastructures proposées sur le marché, pour lesquelles un pont peut connecter jusqu'à une cinquantaine de nœuds.

23 % de cette consommation provient des collectivités locales – soit 12,88TWh – et 5,6 TWh est concentré par l'éclairage public (AFE, 2018). Ce dernier représente (AFE, 2018) :

- 40 % de leur consommation d'électricité ;
- 16 % de leur consommation énergétique totale.

La part importante de l'éclairage public dans la consommation des collectivités, l'augmentation du coût de l'électricité (bien que la consommation moyenne pour une commune ait diminué de 6 % par rapport à 2005, la dépense associée est restée stable (ADEME, 2019)) et les évolutions technologiques apparues il y a quelques années (dont notamment le développement des éclairages LED) ont mené les collectivités à définir des plans de rénovation de leurs candélabres, dont l'un des piliers essentiels est l'introduction d'une part « d'intelligence » devant permettre une meilleure gestion des systèmes d'éclairage.

Les services proposés par les technologies connectées intégrées aux systèmes d'éclairage publics sont par exemple :

- Le « dimming », permettant de faire varier le flux lumineux et ainsi baisser la tension aux heures de faible affluence,
- La télégestion, permettant de commander l'allumage, l'extinction ou la variabilité de chaque point lumineux à partir d'un poste central,
- La télémaintenance, permettant de suivre le bon fonctionnement de chaque point lumineux et, le cas échéant, de planifier des remplacements.

L'ensemble de ces services permettraient d'atteindre 30 % d'économies d'énergie supplémentaires à celles réalisables par le remplacement des lampes à incandescence par des ampoules LED (Sikder, A., M. et al., 2018).

D'autres services sont envisagés dans les scénarios de ville connectée, sans rapport direct avec l'éclairage mais profitant du maillage dense d'infrastructures publiques que constituent les réseaux d'éclairage public :

- Une connectivité internet en **Li-Fi** (transmission de l'information à travers les ondes lumineuses), ou **très haut débit** (THD) en **5G** en utilisant les candélabres comme support pour les antennes des petites cellules 5G,
- Un meilleur suivi de la qualité de l'air en positionnant des capteurs sur les mâts d'éclairage,
- La possibilité de recharger des véhicules électriques sur des bornes utilisant l'alimentation électrique des **candélabres**,
- Une amélioration de la sécurité en ville en déployant un réseau de caméras et de systèmes d'alertes plus performants,
- Une meilleure gestion de la circulation et du stationnement en ville, des flux de piétons, etc. grâce à des capteurs mis en place sur les mâts.

Architecture du réseau d'éclairage public

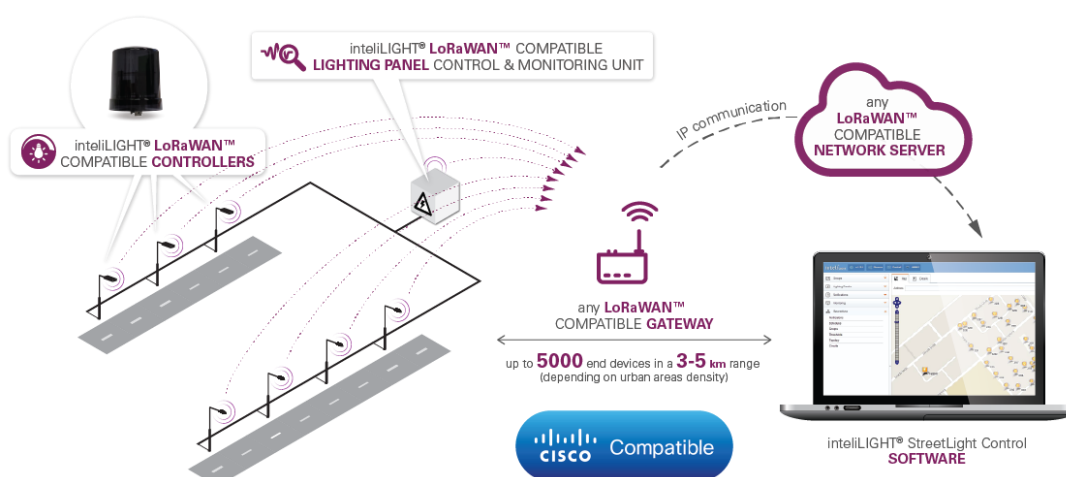


Figure 9 - Architecture d'un réseau d'éclairage public
[Source : Cisco]

L'objet de ce cas d'étude est un système d'éclairage public connecté que l'on considère avec la totalité de l'infrastructure qu'il représente. La Figure 9 décrit un exemple d'architecture d'un réseau d'éclairage public intelligent. Il est constitué des éléments suivants :

- **Un module de contrôle** : sur chaque candélabre associé à la lampe se trouve un module électronique de contrôle de la lampe et un module de communication. Celui-ci peut assurer la connexion soit par radio soit par voie filaire – comme par exemple par courant porteur (CPL). Sa portée doit être suffisante pour atteindre le contrôleur de grappe.
- **Un contrôleur de grappe** : son rôle est d'assurer le dialogue entre les contrôleurs locaux et les serveurs centraux. Pour cela, il intègre deux modules de communication : l'un compatible avec les modules locaux, l'autre avec le réseau longue distance choisi pour remonter les informations collectées vers les serveurs centraux (réseau 2G+/GPRS).
- **Un serveur central** : il collecte l'ensemble des données, les stocke, les traite et permet d'opérer et de gérer le réseau de candélabres. Ce serveur central peut être dédié à ces fonctions ou se trouver hébergé dans un *cloud*.

Variables d'intérêt

- **Définition des usages voulus** : plusieurs usages et services sont rendus possibles par l'éclairage public connecté (dimming, télégestion, télémaintenance). L'articulation et la gestion de ces différents usages (service choisi et lieu d'implantation) influera sur les conclusions.
- **Type de technologie lumineuse** : la technologie lumineuse dont sont équipés les lampadaires dans ce cas d'étude est la technologie LED.
- **Type de technologie pour la couche connectée** : le nombre de contrôleurs de grappe par nombre de candélabres est fonction du réseau radio courte distance choisi et de la distribution des candélabres dans le tissu urbain⁴². Les paramètres retenus dans ce cas d'étude sont 1 contrôleur pour 15 candélabres, communiquant en local via le protocole ZigBee.
- **Infrastructure de connexion** : le système considéré repose sur une communication via le réseau GPRS entre le contrôleur de grappe et le serveur central.

⁴² Sur la Figure 9, on voit qu'il serait possible de connecter jusqu'à 5000 candélabres par contrôleur grâce au protocole LoRaWAN.

b. Analyse du retour d'expérience et conclusions

L'exercice de quantification est ici effectué sur la base du retour d'expérience d'un opérateur d'éclairage public ayant basculé plusieurs municipalités Suisse sur un système « smart » (IEA, 2016), caractérisé par le jeu d'hypothèses suivant :

- Il est constitué de **33 candélabres et 2 contrôleurs**, qui transmettent les données vers le serveur central de supervision.
- Les transferts de données nécessaires au fonctionnement des candélabres connectés étant de l'ordre de quelques kilo-octets et s'effectuant à des débits relativement faibles, les équipements intelligents répartis entre les candélabres et les contrôleurs restent peu sollicités (1 % du temps en activité, 99 % en veille). **Il sera ainsi uniquement considéré leur consommation électrique en mode veille.**
- Les équipements intelligents sont considérés sous tension à un ratio de 12 h/j⁴³.

Équipements	Conso en W	Durée d'usage pour un an (heures)	Conso pour l'année (kWh)	Nombre	TOTAL
Lampe d'un luminaire	97,00	4 109	399	33	13 153
Partie intelligente d'un luminaire	0,40	4 380	1,752	33	58
Contrôleur local	2,00	4 380	8,76	2	18
Consommation électrique totale des luminaires					13 153
Consommation électrique totale de la couche intelligente					75
Part de la couche intelligente dans la consommation électrique totale					0,57%

Tableau 1 - Données actuellement disponibles quant à l'évaluation de la consommation du système luminaire connecté complet

[Source : (IEA, 2016)]

Une première évaluation de la consommation électrique induite par la couche connectée montre que sa part dans la consommation totale reste très faible (cf. Tableau 1). La mise en regard de ces 0,57 % avec les 30 % d'économie rapportés par le retour d'expérience permet de montrer le risque d'une quantification partielle : la part de la partie smart dans la consommation totale est en effet ici évaluée sur la base de sa simple phase d'utilisation et au travers de sa consommation directe uniquement. Pour parvenir à une quantification exhaustive et pertinente, il sera nécessaire de prendre en compte la consommation du serveur de supervision et celle du réseau GPRS de transmission, ainsi que la consommation d'énergie associée à la phase de production de l'intégralité des équipements composant la couche connectée.

La suite des travaux sur l'éclairage public intelligent visera, entre autres, à explorer et consolider trois axes de réflexion :

- Produire une quantification exhaustive du coût énergétique de la couche intelligente, en prenant en compte tous ses composants, tant dans leur phase d'utilisation que de production.
- Multiplier les retours d'expérience en favorisant des retours sur temps long.
- Explorer les mécanismes d'effet rebond, notamment en comparaison avec les usages dans la sphère privée : l'éclairage public est probablement un domaine d'application de l'éclairage connecté qui présente peu voire pas de risque d'effet rebond dans les usages.

⁴³ Les équipements intelligents utilisent le courant d'alimentation des lampes, qui n'ont besoin d'être allumées au maximum que 12 heures par jour.

D. Synthèse des cas d'étude : axes généraux pour étudier la pertinence de la mise en place d'une technologie de type « Smart Light »

De ce deux premiers cas d'étude peuvent être extraites certaines conclusions liminaires qui serviront de base aux généralisations – après une consolidation évidente des résultats et un croisement nécessaire d'un plus grand nombre de cas d'étude :

- L'efficacité énergétique élevée de la technologie LED⁴⁴ en phase d'utilisation rend l'introduction d'une couche smart peu intéressante voire contre-productive : l'énergie embarquée ainsi que l'énergie d'utilisation de cette couche smart semble rapidement devenir plus importante que les gains énergétiques réalisés.
- L'énergie embarquée de la couche smart ne peut pas être négligée car les conclusions quant à la pertinence de son introduction dans un système sont directement dépendantes de cette quantité d'énergie.
- La conformation et choix techniques du système complet (nombre d'ampoules, de capteurs, de contrôleurs, type de données acquises etc.) sont déterminants dans la pertinence quantitative de la technologie.

E. Suite des travaux et pistes de réflexion

- **Accessibilité des données quantitatives** : il sera nécessaire d'explorer l'étendue et les raisons du manque de données quant à la quantification de l'énergie embarquée. L'accès à des ordres de grandeurs significatifs et vérifiés est en effet le facteur limitant à l'établissement d'une étude quantitative systématique de l'impact énergétique de la phase d'extraction, de design, de production et de fin de vie des nombreux systèmes électroniques entrant en jeu dans les systèmes intelligents (De Decker, K.).
- Peuvent être évoquées, comme pistes d'ouverture intéressantes sur les problématiques liées à la ville connectée, les questions de **sécurité des données**, d'**obsolescence** et d'**effet rebond**.

⁴⁴ La technologie LED consomme jusqu'à 75 % moins d'électricité que son homologue incandescente et possède une durée de vie jusqu'à plus de 25 fois plus importante (OSRAM Opto Semiconductors GmbH, 2009).

II. Réduire l'impact environnemental du système d'information : relever le défi en définissant une stratégie informatique adéquate et en l'implémentant avec des méthodes standards

A. Contexte et objectifs

1. Objectifs

Les enjeux environnementaux, la part de l'ICT (Technologies de l'information et de la communication) dans les émissions de CO2 et l'usage des ressources naturelles sont tels que **chaque organisation quel que soit sa taille va devoir changer son approche du numérique pour apporter sa part dans la réduction collective du poids environnemental des activités humaines**. Dans ce chapitre, le système d'information désigne l'ensemble des outils numériques qu'une organisation utilise ou fabrique pour supporter ses activités.

Ce chapitre a l'ambition d'inspirer **une vision d'un Système d'Information soutenable pour une organisation** tout en apportant les services nécessaires pour ses opérations. Il propose un **cadre méthodologique à mettre en place pour accélérer la mesure et la réduction de l'empreinte environnemental du SI**.



A noter

Dans ce chapitre, le terme **organisation** désigne un groupe organisé vers une finalité commune et qui peut être une entreprise du secteur industriel ou des services, une administration ou une association. Les fournisseurs tels que les cloud providers et les fabricants de matériel informatique sont également concernés.

Ce cadre s'articule autour de 6 grandes activités :

- Prendre en compte les risques environnementaux dans la stratégie informatique
- Renforcer la culture de soutenabilité
- Mesurer l'impact environnemental du système d'information
- Gouverner la transition vers un système d'information soutenable
- Construire un système d'information soutenable
- Adapter la relation avec les fournisseurs et partenaires

L'ensemble de ces activités constitue une démarche et un cadre d'architecture pour structurer la transformation du système d'information. Il peut être pris comme point de départ et être adapté au contexte spécifique de l'organisation.

Les **bénéfices** suivants peuvent être attendus de l'approche qui est proposée ici sans que ce soit exhaustif :

- Contribuer à l'objectif de responsabilité environnementale en réduisant les émissions de GES et en apaisant l'utilisation de ressources
- Renoncer aux stratégies aboutissant à des impasses environnementales et financières
- Être prêt le jour où la législation sera contraignante sur ces sujets
- Proposer aux clients et salariés une vision et une démarche en phase avec leurs préoccupations citoyennes



A noter

Ce chapitre constitue une synthèse d'un document plus détaillé qui sera livré au sein du rapport final.

2. Population adressée

Ce chapitre est à destination des :

- **Directeurs des organisations** porteurs de la stratégie informatique
- **Métiers utilisateurs des services numériques** qui devront repenser leurs usages
- **Directeurs des Systèmes d'Information** qui ont la responsabilité de le développer et de l'opérer
- **Architectes d'Entreprise** en charge de dessiner les architectures à venir et d'éclairer les décisions
- **Professionnels de l'informatique** qui portent la responsabilité de ce système pour leur organisation
- Plus largement **toute personne impliquée dans la transformation numérique d'une organisation**

B. Le système d'information a un impact environnemental

La fausse idée de la dématérialisation du numérique

En première approche, le numérique dématérialise des flux physiques et semble « alléger » et rendre plus agiles les organisations en réduisant l'usage du papier, les intermédiaires pour accéder à un service. En réalité, il matérialise des flux d'informations qui se stockent, cheminent dans des canaux matériels. Il crée une autre forme de matérialité gourmande en énergie, en espace et en matières premières parfois rares : salles machines, terminaux, réseaux, etc.

Nos systèmes d'informations sont obèses

Poussées par des décennies de numérisation des processus internes, de croissance des calculs d'indicateurs (réglementaire, de risque, ou d'aide à la décision) et de support à la croissance de l'entreprise (économie numérique), beaucoup d'organisations se retrouvent dans une situation « d'obésité » technologique due à un empilement incontrôlé de différentes technologies, applications et architectures. L'actif SI, stratégique, peut devenir un handicap incapacitant l'entreprise à s'adapter aux nouvelles réalités économiques. Jusqu'alors, les phases de rationalisation du SI ont plutôt été 'subies' : l'explosion de la bulle Internet de 2001 et du krach financier de 2008 ont déclenché des vagues plus ou moins « dures » de re-factoring du SI qui sont toujours en cours aujourd'hui. Ainsi, le temps de la transformation du SI est un **temps long**, souvent incompatible avec les attentes des clients et des métiers. Comprendre que les nouvelles exigences environnementales auront un effet similaire signifie de mettre en place **tout de suite** une stratégie en adéquation pour éviter le choc d'une transition abrupte.

Et ça se voit sur la balance

Après avoir pris connaissance des chiffres établis dans le premier rapport sur l'impact environnemental du numérique (The Shift Project, 2018), ce sont maintenant les courbes d'explosion des données qui nous interrogent – le Big Data, « new oil » qui faisaient briller les yeux des entrepreneurs enthousiastes du numérique.

Selon une récente étude d'IDC, cabinet de recherche international dans le domaine des technologies, le volume de données stocké atteindra 175 Zo (zettaoctet) en 2025, soit 5,3 fois plus que ce qui était stocké en 2018. Or chaque octet supplémentaire nécessite de l'énergie pour être stocké et induit donc, par là, un surplus d'émissions carbonées. Puisqu'il faut aujourd'hui stabiliser et réduire les émissions de CO₂, on comprend qu'il faut parvenir à stabiliser cette courbe en dédiant nos capacités de stockage aux données les plus utiles.

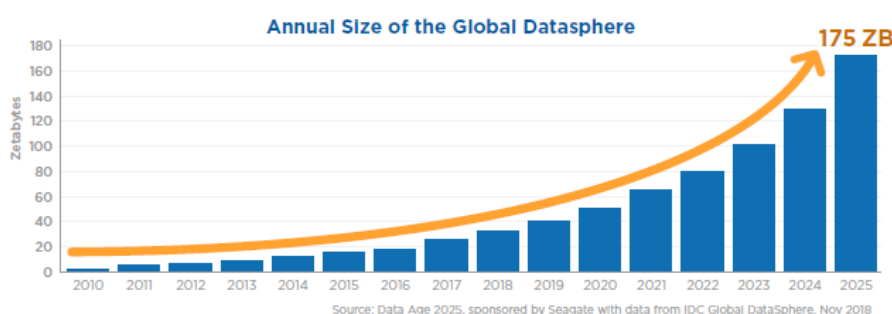


Figure 10 - les courbes d'explosion des données autrefois synonymes de croissance deviennent très préoccupantes
[Source : (Reinsel, D., Gantz, J., Rydning, J., 2018)]

Il va falloir penser à reprendre une activité sportive un peu sérieuse

A l'échelle d'une organisation, faire en sorte d'avoir en tête sa contribution à ces consommations, c'est suivre :

- Une mesure de la dépendance à une ressource qui risque de devenir rare et cher et une estimation du risque économique à un changement réglementaire futur subi ;
- Une mesure de « la forme physique » du SI, i.e. de son efficacité (rapport valeurs/énergie).

L'empreinte énergétique du numérique est aujourd'hui hors de contrôle : au chapitre C.5. Fabriquer un système d'information soutenable quelques pistes sont détaillées pour reprendre le contrôle.

C. Un modèle de remise en forme du système d'information

De nouvelles activités ou des activités existantes à développer sont à mettre en place pour fournir un **Système d'Information Soutenable**. Les activités décrites ici sont communes à toutes les organisations utilisant un Système d'Information. Il est pertinent de les décrire dans un cadre de référence pour établir un langage commun interprofessionnel. Ce cadre a vocation à servir de point de départ pour les équipes. Il sert à classer les activités déjà entreprises, évaluer la maturité, évaluer les points forts et les points à développer, se comparer au marché. Il devra être adapté au contexte particulier de chaque organisation.

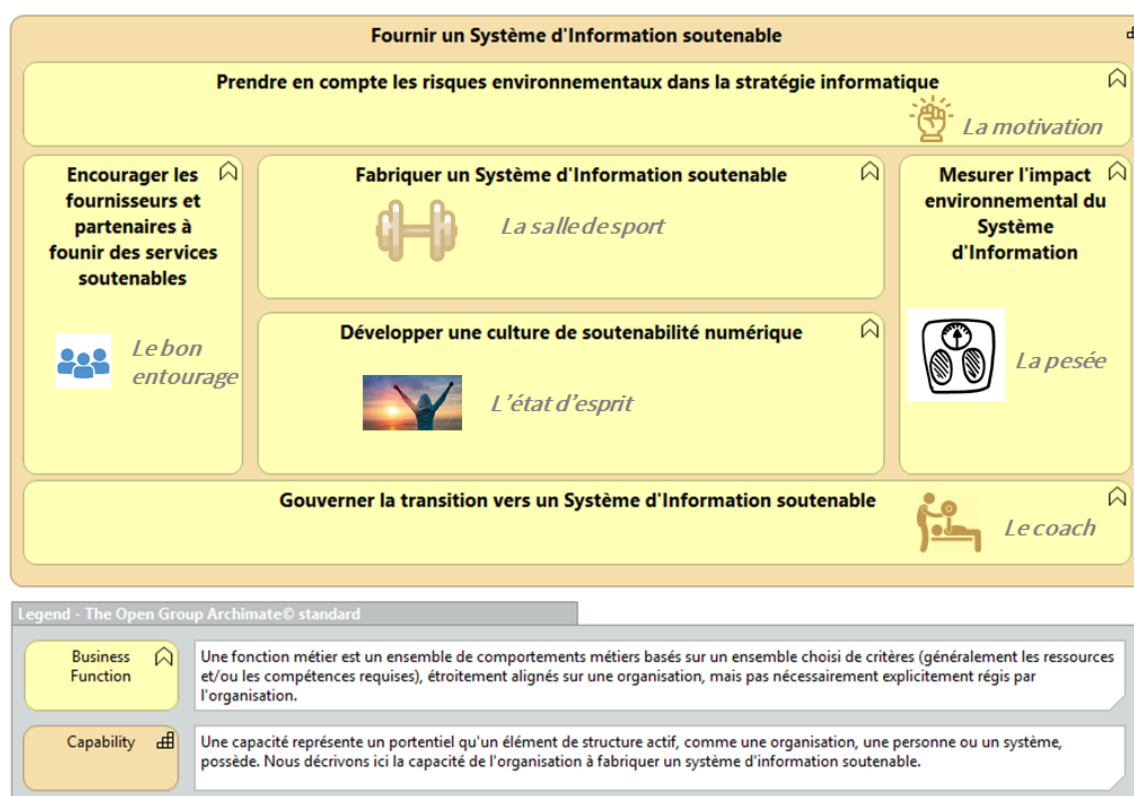


Figure 11 - Modèle référence – vue de haut niveau – pour une remise en forme du Système d'Information
[Source : The Shift Project, Production du groupe de travail]

Prendre en compte les risques environnementaux dans la stratégie informatique

Le Système d'information a besoin d'un programme continu de remise en forme sur le long terme. Ce programme a besoin du support de la direction. Il nécessite de formuler et partager les motivations et les objectifs de transformation vers un Système d'Information soutenable. Ces objectifs doivent s'inscrire dans une stratégie d'ensemble de la soutenabilité de l'Organisation. Une fois la stratégie de soutenabilité définie, les activités qui suivent permettent de l'implémenter.

Développer une culture de soutenabilité numérique

Ce programme a besoin du support convaincu de tous les collaborateurs qui doivent être formés et sensibilisés, afin d'incarner une culture de soutenabilité qui s'inscrira dans le long terme dans l'ADN de l'organisation.

Mesurer l'impact environnemental du Système d'Information

La mesure est le moyen de s'assurer d'une réduction quantitative. Il faut développer les outils pour contrôler, mesurer les progrès, la réduction effective de l'impact du Système d'Information sur l'environnement. Développer cette nouvelle capacité représente des efforts mais elle est indispensable pour suivre la transformation et atteindre des objectifs de réduction significatifs.

Gouverner la transition vers un Système d'Information soutenable

Cette transformation nécessite une rigueur sur le long terme, et une gouvernance impliquant que le critère environnemental sera au cœur des processus de prise de décisions impliquant des évolutions du système d'information, ce qui implique dans un monde digitalisé qu'il soit au cœur des processus décision de l'Organisation dans son ensemble.

Fabriquer un Système d'Information soutenable

Adapter les méthodes de fabrication d'outils numériques pour intégrer dès la conception des systèmes et leur fabrication à l'aide des méthodes agiles les principes de minimisation de l'impact environnemental. Tous les domaines d'architecture sont concernés :

- Les métiers devront remettre en question le principe du tout numérique et ne conserver que les usages les plus utiles et efficaces sur le plan environnemental
- Les applications seront économes en ressources (tant côté serveur que côté client)
- Les données seront gérées avec soin
- Les solutions techniques seront choisies pour leur qualité de réparation, recyclage et d'utilisation optimale de l'énergie

Encourager les fournisseurs et partenaires à fournir des services soutenables

De nombreux services numériques sont achetés à des tiers. Or si l'entreprise qui les souscrit n'est pas responsable de la façon dont ses services sont opérés, elle reste responsable de ses volumes de données, de ses traitements, de ses usages réseaux. L'entourage, l'écosystème de l'organisation est clé dans sa transformation. Choisir des partenaires qui souhaitent s'inscrire dans un cadre soutenable et peuvent aider l'organisation à atteindre ses objectifs de soutenabilité est indispensable.

Ces activités sont détaillées dans le modèle de référence ci-dessous et dans les chapitres qui suivent.

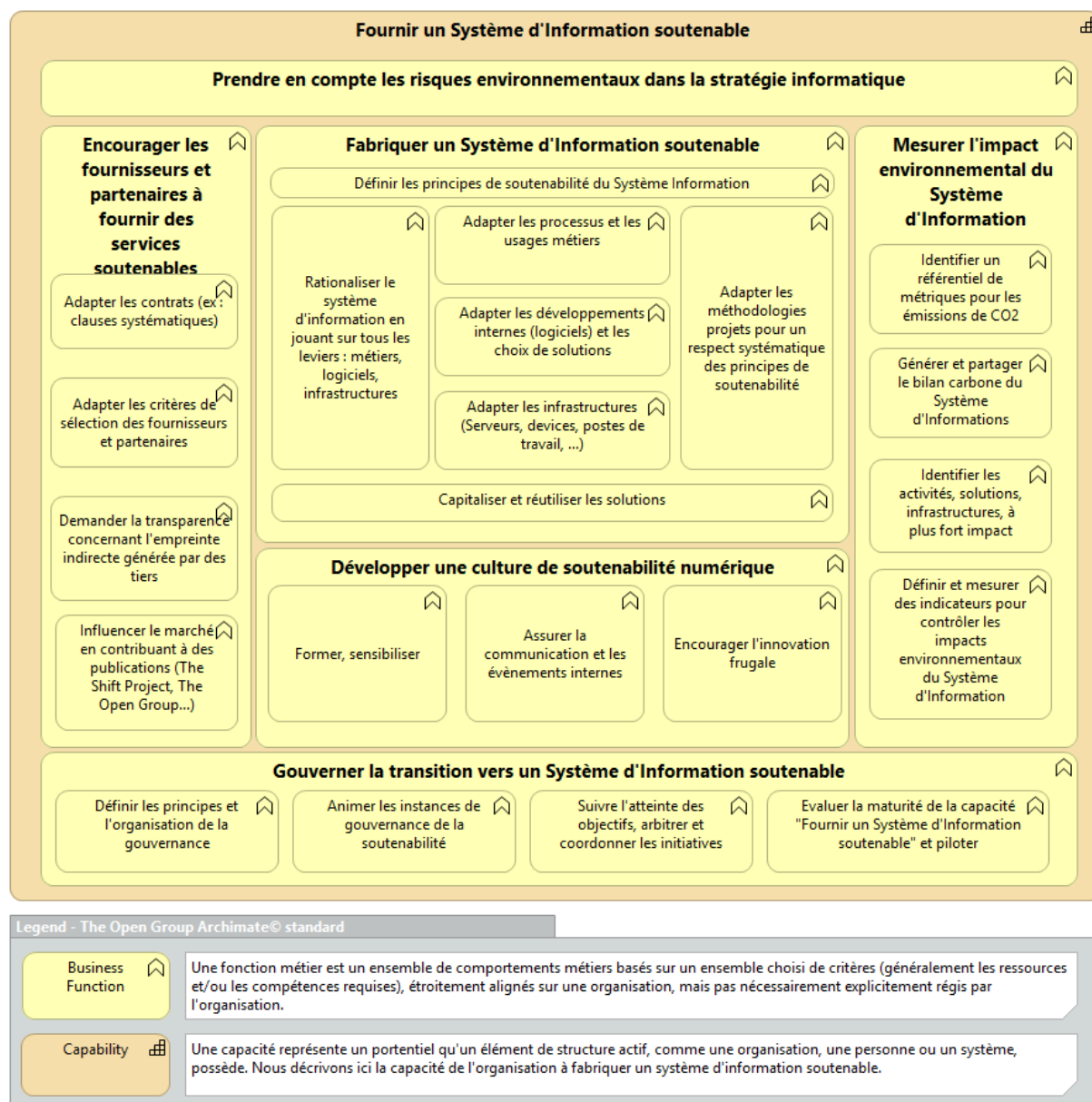


Figure 12 - Modèle référence – vue de détaillée - pour une remise en forme du Système d'Information
[Source : The Shift Project, Production du groupe de travail]

A compléter pour la version finale	✓ Vérifier que le cadre fonctionne pour des industries y compris numériques, des administrations, des organisations
---	--

1. Prendre en compte les risques environnementaux dans la stratégie informatique

L'informatique n'est pas « verte ». L'informatique elle-même a toujours un impact environnemental négatif. C'est le processus métier qu'elle supporte qui peut être rendu plus vertueux pour l'environnement grâce au numérique et compenser la dette environnementale de l'informatique qu'il utilise (ex : système d'optimisation de la consommation d'énergie d'un bâtiment).

L'idée que l'on puisse atténuer l'impact en utilisant des énergies renouvelables pour l'exploitation se heurte à la faiblesse de l'offre pour ces énergies et doit s'accompagner d'un usage frugal.

La prise en compte des risques environnementaux dans la stratégie informatique doit être demandée par la direction. Si ce n'est pas le cas, il faut y travailler.

Plus cet objectif est énoncé tôt, plus l'organisation sera en position favorable quand l'écosystème se transformera avec :

- Une **réglementation** plus contraignante
- Des **jeunes diplômés** plus soucieux de travailler pour un employeur qui ne compromet pas leur avenir,
- Des **clients** soucieux d'utiliser des services respectueux de l'environnement à un prix optimal.
- Des **contraintes sur le prix et l'accès à l'énergie** qui auront un impact direct sur le prix de l'informatique

Ce changement est significatif, les organisations doivent s'y préparer, inventer de nouveaux modèles d'opérations ou économiques offrant des services et le développement d'une activité soutenable, supportée par des systèmes soutenables.

Les facteurs clés de succès pour prendre en compte le risque environnemental dans la stratégie informatique sont les suivants :

- ✓ L'objectif de réduction de l'impact doit être porté par la direction générale
- ✓ Il faut montrer que cet objectif est conciliable avec d'autres objectifs de l'organisation
- ✓ La stratégie de réduction de l'impact environnementale du système d'information doit être intégrée avec la stratégie de réduction de l'impact environnemental de la totalité des opérations de l'organisation (locaux, ressources humaines, voyages...)

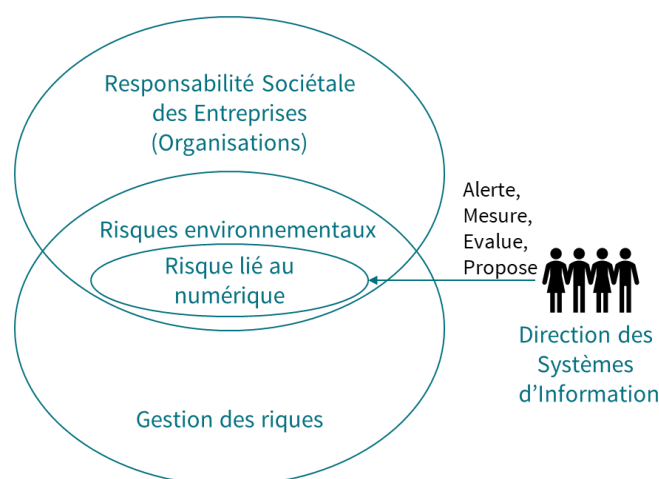


Figure 13 – Risques, responsabilités et rôle de la DSI
[Source : The Shift Project, Production du groupe de travail]

- ✓ La vision stratégique du SI Soutenable doit être clairement explicitée autour d'objectifs de transformation. Cette vision est partagée avec l'ensemble des acteurs concernés et fait consensus.

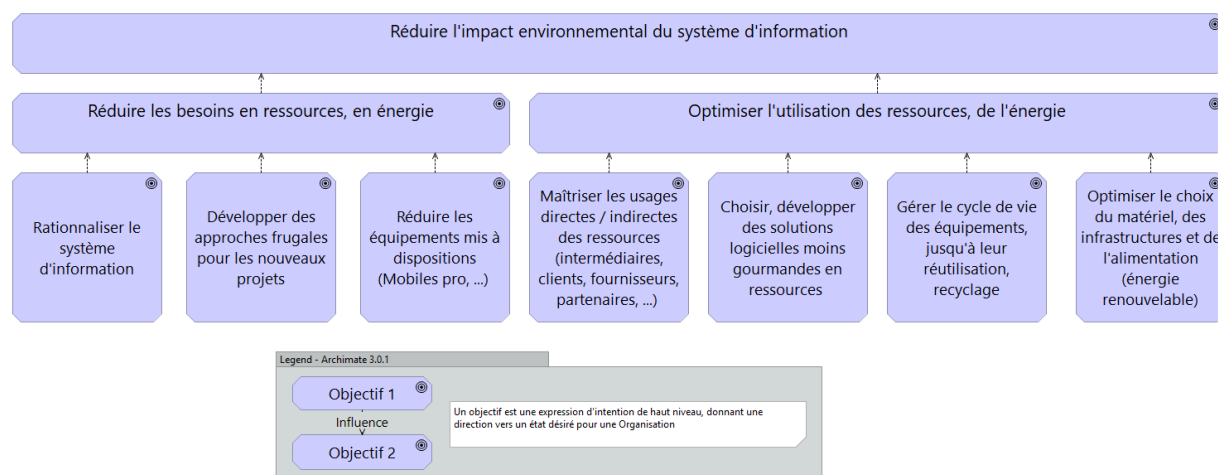


Figure 14- Exemples d'objectifs de la vision stratégique du SI soutenable
[Source : The Shift Project, Production du groupe de travail]

A compléter pour la version finale	✓ Liste de risques formalisée / réutilisable comme première base de travail pour une organisation ✓ Comment faire évoluer les modèles d’affaire : Trouver le moyen de s’orienter vers des marchés à impact environnemental acceptable, et renoncer à des marchés à fort impact concernant plus particulièrement le numérique ✓ Fixer des objectifs chiffrés
--	--

2. Développer une culture de la soutenabilité numérique

Il n’y a pas de transformation soutenable possible sans que la culture de la soutenabilité numérique soit acquise par l’ensemble des acteurs de l’organisation. Or cette culture n’est pas acquise dans le monde du travail. Les efforts conjoints des Directions de l’Innovation, de la Communication et de la Direction des Ressources Humaines devront s’unir pour accompagner ce changement vers la soutenabilité de l’organisation.

Quatre axes sont à développer pour faire émerger une culture qui va fédérer les collaborateurs autour des objectifs stratégiques climatiques :

- ✓ La compréhension de la problématique énergie / climat / raréfaction des ressources et de la contribution du numérique au problème environnemental global
- ✓ Le maintien de la motivation avec des événements dédiés et des objectifs individuels et collectifs clairs et mesurables
- ✓ Le développement de compétences et de savoir-faire en conception de systèmes sobres

Ces actions aboutiront au développement et l’encrage de réflexes de soutenabilités

3. Mesurer l’impact environnemental du Système d’Information

L’établissement d’une mesure de l’impact environnemental du SI à la fois précise, juste et calculable est essentiel pour piloter la bonne mise en œuvre de la stratégie de maintenir l’effort dans le temps et pour les nouvelles initiatives. La mesure est un prérequis à la mise en place d’une gouvernance.

De façon à considérer et atténuer les effets rebonds ou les phénomènes de vase communicants, le périmètre du Système d’Information piloté correspondra au scope 3 défini ci-dessous et inclura :

- ✓ A la fois la **fabrication et l’utilisation** des appareils numériques serveurs ou terminaux requis pour faire fonctionner les services de cette organisation qu’ils soient fabriqués et opérés directement par elle ou par des tiers. Par exemple, l’impact environnemental des services fournis par des hébergeurs tels que les

acteurs du cloud computing (Microsoft, Amazon, Google, OVH...) et utilisés dans le Système d'Information sont inclus dans le périmètre piloté.

- ✓ Les **terminaux** utilisés par les employés de l'organisation mais aussi les terminaux requis pour les clients, partenaires pour interagir avec l'organisation en question. Par exemple, si une application mobile est mise à disposition des clients, un part de l'impact environnemental de leur smartphone doit être pris en compte.

 <i>Definition</i>	Bilans d'émissions de GES scopes 1, 2, 3 Les mots scope 1, scope 2 ou scope 3 sont utilisés dans le cadre de bilan d'émissions de GES d'un produit ou d'une organisation. Le bilan GES sert à déterminer combien de gaz à effet de serre sont émis lors de la fabrication d'un produit, ou au cours des activités d'une organisation sur une période donnée. Dans ce cadre, les scopes désignent le périmètre au sein duquel sont étudiées les émissions de gaz à effet de serre de l'organisation ou du produit en question : • Le scope 1 correspond regroupe les émissions de gaz à effet de serre directement émis par l'organisation. Exemple : le CO2 émis par les flottes de commerciaux véhiculés • Le scope 2 regroupe les émissions de gaz à effet de serre liées aux consommations d'énergie nécessaires pour le fonctionnement de l'organisation. Exemple : le CO2 émis pour l'électricité consommée. • Le scope 3 regroupe quant à lui toutes les autres émissions de gaz à effet de serre qui ne sont pas liées directement à l'organisation mais requis pour son fonctionnement. Exemple : approvisionnement, transport, fin de vie... (Youmatter, 2019)
--	--

Les premières mises en œuvre de « Mesure de l'impact environnemental du Système d'Information » font les constats suivants :

- ✓ A ce jour, nous ne connaissons pas d'organisations qui mesurent et pilotent leur impact environnemental sur la totalité du périmètre décrit ci-dessus
- ✓ La mesure s'établit en premier lieu sur les composants techniques et peut ensuite s'agréger sur les composants applicatifs ou les services métiers si l'architecture du Système d'Information est bien documentée
- ✓ Un référentiel si possible public tel que le Référentiel Environnemental du Numérique (REN) mis à disposition avec le rapport Lean ICT v1 de 2018 peut être utilisé et croisé avec les inventaires matériels de l'organisation. Le REN met à disposition du public des données d'émissions de GES et d'utilisation de métaux pour les phases de production et d'exécution. Cette façon de faire présente l'avantage de fournir une mesure précise en GES.
- ✓ Il ne faut pas rechercher une mesure ultra précise à tout pris sur la totalité du périmètre mais une mesure qui respecte les ordres de grandeur et qui permet de piloter l'évolution dans le temps. Par exemple, si les inventaires de matériel sont bien maintenus, ils peuvent être utilisés mais si ce n'est pas le cas et que l'effort de mise à jour est trop important, d'autres pilotages peuvent être envisagés.
- ✓ A ce stade, il est choisi de se concentrer sur les émissions de CO2 qui représentent à la fois un indicateur central, partagé et qui permet de se comparer aux autres et aux objectifs nationaux. Il représente un effort significatif pour être établi. Il pourra être envisagé d'établir des mesures sur l'utilisation des métaux, des ressources en eau dans la suite
- ✓ Avant d'arriver à la mesure de GES, des mesures intermédiaires, plus habituelles pour les professionnels de l'informatique peuvent être pilotées. En effet leur croissance est liée l'augmentation des émissions de GES : volumes stockés, volumes transitant sur le réseau, traitements exécutés. Dans le cas de services mis à disposition par des tiers comme le cloud computing, quand le détail n'est pas connu de l'entreprise utilisatrice, ces mesures intermédiaires peuvent permettre un premier pilotage en attendant que des standards et des obligations de communiquer ces données soient mis en place

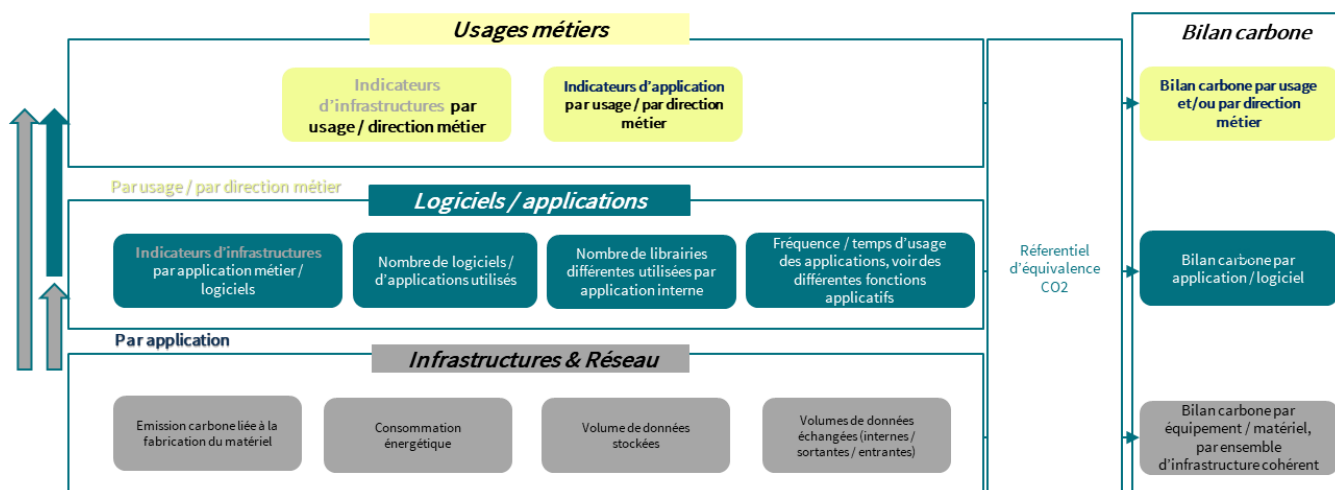


Figure 15 - Mesurer l'impact environnemental du Système d'Information à différents niveaux
[Source : The Shift Project, Production du groupe de travail]

A compléter pour la version finale	✓ Référentiels / Normes / Standards existants ✓ Exemples d'organisations ayant mesuré ou de reporting environnemental
--	--

4. Gouverner la transition vers un système d'information soutenable

La gouvernance est le système par lequel une organisation prend des décisions et les applique en vue d'atteindre ses objectifs. La prise de décision détermine l'orientation de l'entreprise dans le temps. Elle peut être formelle, reposant sur des processus définis, ou informel, reposant sur les actions des personnes constituant l'entreprise.

Dans le cas des organisations où la gouvernance est un processus formel avec des cadrages de projets ou une gouvernance d'architecture, l'organisation en place pourra être mise au service d'une trajectoire vers un système d'information soutenable.

Il faudra pour chaque nouvelle transformation :

- Évaluer l'impact environnemental des nouvelles capacités créées
- L'évaluer au regard des gains éventuels ainsi que l'opportunité de réduire l'impact de l'existant

Energie pour la production
Consommation en utilisation
Ressources minières
etc.

Smart Grids
Smart Buildings
Smart Cities
etc.

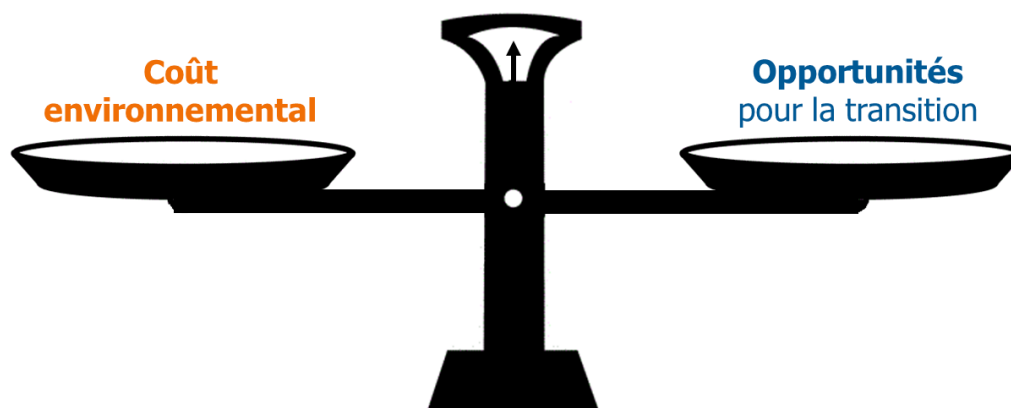


Figure 16 - Une gouvernance du numérique en recherche d'équilibre
[Source : The Shift Project]

A compléter pour la version finale	✓ Chapitre en ébauche à compléter
--	--

5. Fabriquer un système d'information soutenable

De la même façon que pour la mesure, peu d'organisations ont travaillé à fabriquer un système d'information soutenable.

Une Direction de Systèmes d'Information qui reprend ce contrôle, c'est une direction qui :

Concernant le hardware :

- Prolonge leur utilisation au maximum, au-delà de la seule durée d'amortissement
- Répare les équipements numériques qu'elle gère, limite les remplacements au maximum
- Recycle les équipements numériques hors d'usage et contrôle ce recyclage
- Choisi des équipements numériques démontables et réparables
- Choisi les fournisseurs de services numériques (cloud providers de services, d'applications ou de Hardware) qui sont transparents sur l'impact environnemental et qui ont une politique environnementale ambitieuse
- Eteint les équipements quand ils ne sont pas utilisés
- Etudie tout achat de nouveau matériel au regard du besoin et privilégie la réutilisation et la mutualisation
- Mesure l'empreinte environnementale de l'ensemble de son infrastructure

Concernant les données :

- Regarde les données, les corrige, les connaît, les documente en développant une pratique de gestion des données et l'outillage associé
- Elimine les redondances de données, gère les cycles de vie des données au sein de la DSI et avec les métiers
- Challenge les demandes d'augmentation de capacité de stockage, de traitement, de réseau au regard de leur impact environnemental

Concernant l'architecture :

- Développe une pratique d'architecture métier pour garantir l'efficacité des services mis à disposition
- Challenge tout achat d'une nouvelle solution logicielle par rapport au besoin
- Lorsqu'une nouvelle solution est choisie, garantit le remplacement et la suppression de la solution en place
- Partage intensivement sa démarche pour l'améliorer et la confronter à celle des autres entreprises, les organismes de standard pour augmenter l'intelligence collective, optimiser les solutions rapidement. La capitalisation des bonnes pratiques permet ensuite leur diffusion par l'enseignement supérieur et les organismes de formation professionnelle et l'accélération. Les organisations peuvent ensuite bénéficier de professionnels formés et permettre une accélération collective sur ces sujets
- Identifie et découple les services qui nécessitent une très haute qualité de services énergivore pour limiter leur impact

Voici ci-dessous les enseignements tirés des premières approches :

- ✓ Les leviers de réduction de l'impact sont à tous les niveaux (Usage, organisation, processus métiers, applications, logiciels & développement, données, Infrastructures) et tous les leviers doivent être activés
- ✓ Une double approche doit être mise en œuvre : Une approche centrée sur les usages « TOP-DOWN » et en proximité des acteurs métiers, dont l'objectif est de réduire l'empreinte d'usages identifiés (ex : « L'envoi de mail », « le partage de document », « Un usage particulier d'une application métier »), et une approche centrée sur les infrastructures (BOTTOM-UP) dont l'objectif est de réduire l'empreinte d'éléments d'infrastructures identifiées comme gourmands en ressources (et portant potentiellement plusieurs usages). Ces réductions peuvent s'obtenir en augmentant la durée d'usage des équipements, leur recyclages, leur optimisation. Ces deux approches se rejoignent et permettent d'aboutir sur l'identification d'ensemble complet d'actions de réductions

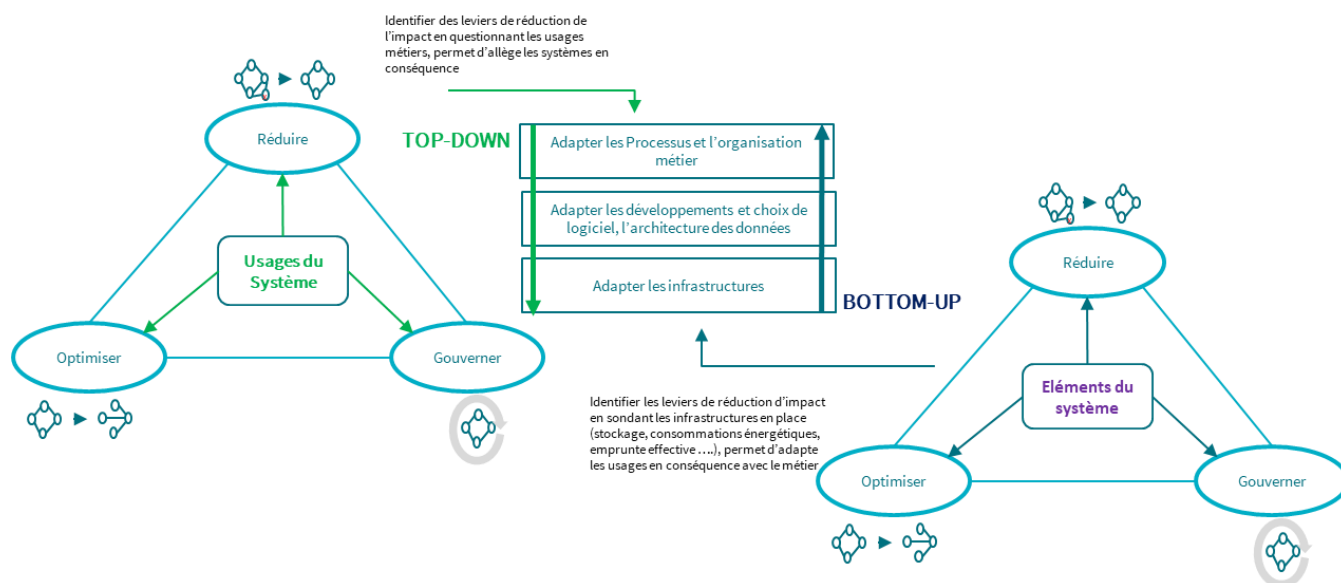


Figure 17 - La soutenabilité doit être travaillée à la fois en questionnant les usages TOP-DOWN et en mesurant, optimisant les infrastructures BOTTOM-UP

[Source : The Shift Project, Production du groupe de travail]

- ✓ La démarche d'architecture d'entreprise est pertinente pour planifier la transformation à long terme de manière cohérente et en prenant en compte les points de vue toutes les parties prenantes, et en assurant l'aide à la décision sur différents scénario d'architectures soutenables
- ✓ Les méthodes utilisées pour la réalisation des projets dans les organisations telles que les méthodes agiles, doivent intégrer systématiquement les exigences de soutenabilité dans la mesure de la valeur du produit numérique. L'approche doit être adaptée pour assurer une frugalité aussi bien fonctionnelle, technique et énergétique dès la conception.

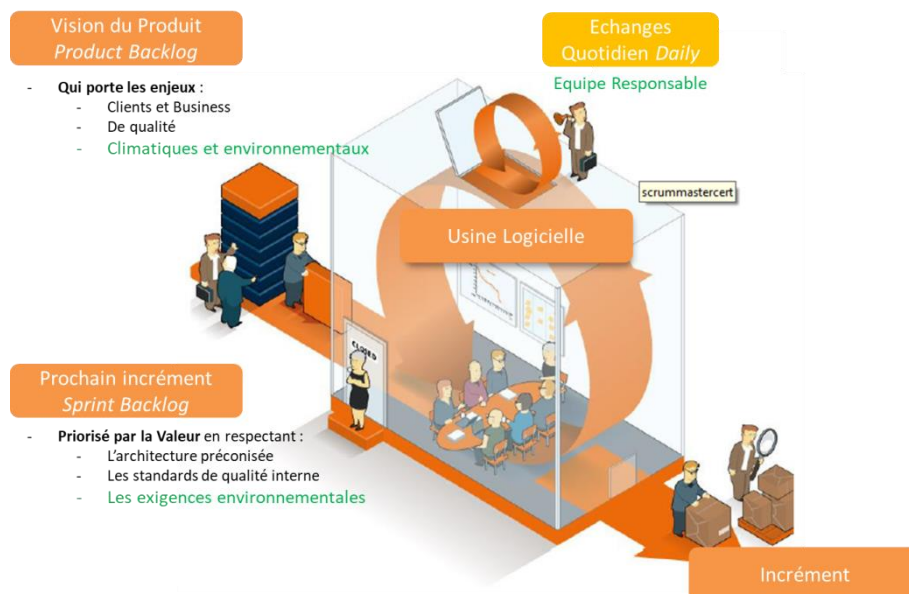


Figure 18 - Intégration des exigences environnementales dans la démarche agile
[Source : The Shift Project, Production du groupe de travail]

A compléter pour la version finale	✓ Liste de principes formalisée / réutilisable comme première base de travail pour une Organisation ✓ Exemples de Systèmes soutenables (ex : Wikipedia)
--	--

6. Encourager fournisseurs et partenaires à fournir des services soutenables

A compléter pour la version finale	✓ Chapitre à rédiger
--	--

III. Construction des usages numériques : explorer leurs effets sociétaux et sur la santé

A. La sobriété numérique : une question d'usages

Déployer la sobriété numérique, c'est mettre au point une stratégie qui permette de concevoir et utiliser notre système numérique de manière à ce qu'il soit compatible avec les contraintes physiques naturelles. Or ce système est composé de deux ensembles qui interagissent :

- **Un système d'usages** : il rassemble les actions permises par les outils numériques (envoyer un email, regarder une vidéo en ligne, traiter des données, rédiger ce rapport etc.) ainsi que les dynamiques comportementales et sociétales qui en résultent (fréquence d'utilisation du smartphone par un individu, types de contenus consommés, types de données produites et stockées etc.).
- **Un système technique** : il rassemble les composantes physiques du système numérique, qui supportent et permettent les usages. Terminaux utilisateurs, infrastructures réseau et centres de données sont les trois composantes de ce système technique, qui constitue la partie matérielle du numérique.

On ne saurait s'affranchir, donc, d'une réflexion sur la construction du système d'usages. Pour réfléchir un numérique sobre véritable, il est nécessaire de se doter des outils nous permettant de **comprendre les processus comportementaux indissociables de la construction du système d'usage qui génère le numérique insoutenable tel qu'il existe aujourd'hui.**

Nous avons démontré, dans notre dernier rapport « Climat : l'insoutenable usage de la vidéo en ligne » (The Shift Project, 2019), la nécessité de convoquer un débat collectif et public sur les usages. Public, parce qu'il est du devoir des pouvoirs publics de l'initier, de par l'ampleur sociétale des problématiques qu'il soulève. Collectif, parce qu'il est indispensable de rassembler les acteurs et outils dont nous disposons pour le construire de manière pertinente : organes régulateurs des usages en ligne, plateformes de diffusion des contenus en ligne, représentants des consommateurs et communautés de designers compétentes sur les interactions entre design et orientation des comportements, etc.

Or, un débat public qui questionne les comportements quotidiens d'une société s'étend inévitablement sur un nombre conséquent de dimensions des usages. L'objectif central du travail qui est ici développé est ainsi de comprendre que la sobriété numérique, puisqu'elle touche à la construction des usages, soulève des questions qui dépassent le cadre de son unique aspect énergétique, jusqu'à rejoindre les effets les plus directs de nos usages numériques sur les individus : les problématiques sanitaires. Malgré l'impératif de son traitement, la dimension sanitaire dépasse la sphère d'expertise première du *Shift*. L'exercice a ainsi été construit dans ce projet comme une revue des connaissances académiques aujourd'hui établies sur le sujet par la recherche en médecine, en s'appuyant sur l'expertise de membres de notre groupe de travail pour les comprendre et les retranscrire.

Les résultats présentés dans ce rapport intermédiaire sont une partie seulement de ce travail, en cours. Les analyses que vous trouverez dans les lignes qui suivent se concentrent ainsi dans un premier temps sur certains des effets sanitaires délétères indissociables de la consommation de services numériques *telle qu'elle existe aujourd'hui*. Cela permet en effet non seulement de **décrire certaines grandes dimensions sociétales de nos usages numériques actuels**, mais également d'explorer les **synergies et co-bénéfices** qui peuvent exister et être entretenus entre une sobriété numérique sur le plan énergétique et les questions de santé publique qui se dessinent quant à l'utilisation des outils numérique.

B. Penser les effets délétères des usages numériques dans la vie de l'enfant et de l'adolescent

1. L'exposition aux écrans : conséquence d'une consommation n'ayant pas été préalablement analysée

L'exposition aux écrans n'est pas un phénomène nouveau. Depuis l'arrivée des écrans de télévision dans les foyers domestiques dans les années 50, des chercheurs ont identifié les effets de ces usages et de cette forme inédite de spectacle sur les individus téléspectateurs et les corps sociaux. En 1977, Marie Winn publiait « The Plug-In Drug: Television, Children, And The Family » (Winn, 1977) dans lequel elle décrit l'influence addictive des écrans de télévision sur les tout petits et mettait en lumière l'expérience excluante que représente le fait télévisuel : « *on regarde toujours la télévision quand on regarde la télévision plutôt que d'avoir une autre expérience.* »

Pour certains spécialistes (Dr. Baton-Hervé, 2019) (Dr. Ducanda, 2019) (Desmurget, 2013) (Desmurget, M., 2019) (Bihouix, Ph., Mauvilly, K., 2016) (Duflo, 2018) (Dieu Osika, S., 2018), l'arrivée des écrans numériques dans le quotidien opère un glissement vers une surconsommation des écrans qui n'a pas été pensée ou analysée a priori. Or, cette surconsommation entraîne des mésusages et des utilisations non pertinentes des dispositifs numériques. Elle serait à l'origine de risques pour la santé, notamment chez les adolescents et les tout-petits.

La pratique des écrans est devenue une activité routinière chez les adolescents. En moyenne les 13-18 ans y passent 6h40 par jour, ce qui représente 40 % de leur temps normal d'éveil (Rideout V., 2015). Cette exposition représente l'équivalent de « 2400 heures par an, 100 jours, 2,5 années scolaires, ou encore la totalité du temps consacré de la sixième à la terminale pour un élève de filière scientifique à l'enseignement du français, des mathématiques, et des Sciences de la Vie et de la Terre » (Desmurget, M., 2019). Chaque jour les possesseurs de smartphone adultes ou adolescents⁴⁵ subiraient entre 50 et 150 interruptions en moyenne, soit une toutes les 7 à 20 minutes (sommeil exclu) (Gazzaley A., 2016) (Markowitz, 2015).

2. Des risques d'effets délétères sur le développement de l'enfant

a. Sommeil

Les études pointent du doigt les conséquences délétères de l'exposition aux écrans en soirée sur les jeunes enfants et adolescents. Ainsi, les enfants disposant d'une TV dans la chambre ont 2,5 fois plus de risques d'endurer un sommeil troublé et peu réparateur (cauchemars, terreurs nocturnes, fatigue au réveil...) (Brockman P. E. et al., 2016).

Le manque de sommeil a des conséquences. Par exemple, il perturbe la réactivité et la connexion des circuits cérébraux impliqués dans la gestion des émotions. Les enfants et adolescents surexposés présentent ainsi des comportements plus irritables et une gestion des émotions plus chaotique que ceux qui le sont très peu (Gujar N. et al., 2011) (Yoo S. S. et al., 2007).

Du côté des adolescents, près de 45 % de filles et garçons entre 11 et 18 ans reconnaissent rester éveillés ou se réveiller pour aller sur internet la nuit. 33 % déclarent passer plus de 4h par jour sur Internet et cela augmente à 40 % pendant les weekends. Ces comportements entraînent d'importants déficits du sommeil, élément pourtant crucial au bon développement cérébral et moteur des tout jeunes enfants et adolescents. Outre le manque de sommeil engendré par ce comportement, la privation d'un besoin essentiel dans le but de consommer des écrans démontre de la capacité d'addiction de ces dispositifs (Génération Numérique, 2017).

Enfin, une vaste méta-analyse réalisée sur 125 000 individus âgés de 6 à 19 ans a récemment identifié « une association forte et robuste entre l'usage d'appareils numériques [portables] à l'heure du coucher et une quantité de sommeil inadéquate, une qualité de sommeil médiocre et une somnolence diurne » (Carter B. et al., 2016).

⁴⁵ 77 % de la population de 12 ans et plus est équipée d'un smartphone en 2019, et 95 % d'un téléphone mobile (Credoc, 2019)

COGNITION	• Prise de décision, notamment dans le cadre de tâches complexes • Attention • Mémorisation • Maturité cérébrale et développement cognitif • Créativité (résolution de problèmes complexes) • Résultats scolaires • Productivité au travail
ÉMOTION	+ Désordres émotionnels + Impulsivité, hyperactivité, troubles du comportement + Agressivité
SANTÉ	+ Obésité + Diabète de Type 2 + Risques cardio-métaboliques (hypertension, diabète, infarctus, etc.) • Réponse immunitaire • Intégrité cellulaire (en particulier, correction des dommages infligés à l'ADN par l'activité cellulaire) + Mortalité + Accidents de la route et du travail + Risques de démence

Tableau 2 - Impacts du manque de sommeil sur l'individu. Le manque de sommeil chronique entraîne une altération du fonctionnement cognitif, émotionnel et sanitaire.
[Source : (Desmurget, M., 2019)]

b. Retard du langage

Le lien entre la surexposition aux écrans et les retards de langage chez les très jeunes enfants est établi par la littérature scientifique (développements et références ci-après). Les études montrent de façon univoque que la surexposition aux écrans entraîne un retard de langage chez tous les enfants, même si les publics les plus précaires sont les plus exposés. Plus l'exposition est longue et répétée, plus les retards sont importants. Si le déficit peut-être encore plus grave chez les publics précaires, c'est notamment parce que des contenus vidéos sont davantage utilisés pour familiariser les enfants avec le langage dès le plus jeune âge (contenus dits « pédagogiques »). Or l'apprentissage du langage chez les tout-petits ne peut correctement s'effectuer que sur un mode à la fois réceptif et expressif, c'est-à-dire en interaction avec une personne humaine. Les expositions répétées aux écrans entraînent ainsi des effets contre-productifs.

Un facteur de risque

Une étude réalisée sur les enfants de 18 mois a montré que chaque demi-heure supplémentaire quotidienne passée à utiliser un appareil mobile multiplie par 2,5 la probabilité d'observer des retards de langage (Van den heuvel M. et al., 2019). D'autres études parviennent à la même conclusion sur des enfants de 24 à 30 mois. Une autre étude a conclu qu'une exposition de plus de 2 heures par jour chez les enfants de 15 à 48 mois multiplie le risque de déficit langagier par 4. Ce risque est multiplié par 7 pour les enfants initiés avant l'âge de 1 an (Chonchaiya W. et al., 2008).

Une petite « dose » d'écran est une dose de trop chez le jeune enfant

Même ceux qu'on pourrait qualifier de « petits consommateurs » sont concernés par ce déficit (Birken, C., 2017) (Masur, 2016) (Pempek, T. et al., 2014) (Tanimura, M., 2007) (Zengin-Akkuş, P. et al., 2018) : une étude a mis en avant que les enfants consommant moins d'une heure par jour d'écran multiplient leur probabilité de retard de langage par 1,45 par rapport à un non-consommateur. Cette probabilité passe à 2,75 pour les usagers dits modérés (1 à 2 heures par jour) et à 3,05 pour les usagers importants (plus de 3 heures par jour) (Byeon H. et al., 2015). Plusieurs études ont démontré l'existence d'atteintes significatives dans le domaine du langage à moins de 30 minutes d'exposition par jour (Van den heuvel M. et al., 2019).

Les publics plus âgés sont également concernés. Ainsi une étude a démontré le risque de déficit langagier sur des enfants âgés de 8 à 11 ans. Au-delà de 2 heures par jour, l'exposition aux écrans entraîne une altération des performances intellectuelles globales dont le langage (Walsh J. J. et al., 2018).

D'autres études ont mis en évidence une corrélation négative entre le temps d'usage des écrans et le QI verbal (intelligence langagière) (Takeuchi H. et al., 2015) (Takeuchi, H. et al., 2016).

Le retard de QI verbal observé dans le cas d'une exposition aux écrans est comparé par le Dr Desmurget (Desmurget, M., 2019) à celui observé par Lisa M. Chiado et al. (Chiado L. M. et al., 2007) dans des cas de saturnisme suite à une intoxication au plomb.

c. Troubles de l'attention

Plusieurs études ont démontré que la consommation d'écrans récréatifs est également associée au risque du trouble de l'attention et de l'hyperactivité (TDAH) chez l'enfant et l'adolescent (Nikkelen, 2014) (Tamana S. K. et al., 2019) (Ra C. K. et al., 2018) (Weiss M. D. et al., 2011).

Ce trouble n'est pas sans conséquence puisque, outre les difficultés du quotidien qu'il peut impliquer, il entraîne souvent une prise en charge médicamenteuse de l'enfant ou de l'adolescent (dont parfois des psychostimulants). Des observations épidémiologiques récentes montrent une forte augmentation des diagnostics de TDAH et des prescriptions médicamenteuses associées au cours des deux dernières décennies (Raman S. R. et al., 2018) (Xu G. et al., 2018).

d. Troubles physiques

Des risques de développer la myopie

Certaines études (Hansen, 2019) permettent de mettre en avant le fait que le risque de développer la myopie est doublé pour les personnes qui sont physiquement actives moins de 3 heures par jour et qui utilisent leurs écrans plus de 6 heures par jour. L'activité physique est donc un facteur protecteur et le travail de très près est un facteur de risque dans le développement de la myopie chez les adolescents et jeunes adultes⁴⁶.

Une autre étude longitudinale réalisée sur une cohorte d'enfants de 5 à 15 ans en Inde conclut que la prévalence de la myopie est associée à la consommation d'écran que sont les ordinateurs et les consoles de jeux vidéo (Saxena, 2017). Cette conclusion est confortée par d'autres études, notamment celle de (Chellavel Ganapathi K. et al., 2017) réalisée sur 854 enfants scolarisés de 6 à 12 ans et concluant que « le temps consacré aux gadgets visuels (visual gadgets) était le principal facteur associé à la myopie ».

La posture liée à l'utilisation des écrans provoque des douleurs musculo-squelettiques.

L'utilisation des écrans induit une ou des postures physiques spécifiques. L'usage du smartphone, de la télévision ou de l'écran d'ordinateur repose sur un « immobilisme » physique de l'utilisateur. Des études ont montré que cette absence de mouvement provoque des troubles et notamment des douleurs même chez les jeunes individus.

Une étude établie sur une population de 1884 adolescents de 10 à 18 ans (Singapour) montre que l'augmentation de l'exposition au smartphone était associée à une augmentation du risque d'inconfort du cou, des épaules, du haut du dos, des poignets, des mains et de symptômes visuels (Toh S.H. et al., 2019).

Une autre étude réalisée sur 25 individus âgés de 10 à 12 ans met en avant le fait que l'utilisation d'une tablette posée sur un socle (type table) est moins douloureuse que l'utilisation d'une tablette posée sur les genoux. Les participants ont joué 15 minutes dans chacune des positions. La douleur a été mesurée au cou, aux épaules, dans le dos et aux bras immédiatement après usage. Une électromyographie a mesuré l'activité des nerfs et des muscles au niveau des muscles cervicaux érecteur, du trapèze supérieur, du trapèze moyen et des extenseurs du poignet au cours des deux dernières minutes. L'utilisation de la tablette sur table a montré une bien moins grande sévérité de douleur dans la région du cou comparativement à l'utilisation de la tablette sur genoux (Intolo, P., 2019).

e. Bien-être socio-émotionnel

De nombreuses études sur les comportements socio-émotionnels convergent pour mettre en avant un bilan délétère de la pratique des écrans. Il semble ainsi exister une corrélation négative entre le bien-être socio-émotionnel et le

⁴⁶ Dans une étude de 2017 menée sur 11 138 étudiants, la prévalence de la myopie était associée entre autre à un usage de l'ordinateur de plus de 3h par jour (Wang, L. et al., 2017)

temps consacré aux écrans (Rideout V., 2015) (Kross E. et al., 2013) (Verduyn P. et al., 2015) (Lin, 2016) (Primark B. A. et al., 2009) (Shakya H. B. et al., 2017) (Twenge J. et al., 2018) (Twenge J. et al., 2017).

Certaines recherches ont démontré que, d'une manière générale, l'usage du smartphone et d'Internet entraîne les mêmes comportements de dépendance que l'addiction à n'importe quelle substance ou produit (selon l'échelle d'évaluation du (American Psychological Association, 2013)). Cet effet est connu des producteurs de contenus numériques qui utilisent les caractéristiques de la psychologie humaine (dont : besoin de socialisation, de valorisation et de récompense) comme levier et opportunité de développement. Comme tout mécanisme d'addiction, l'usage des écrans impacte plus fortement les populations les plus vulnérables et exposées. Dans sa nouvelle version de la Classification Internationale des Maladies (World Health Organization, 2018), l'Organisation Mondiale de la Santé reconnaît la dépendance aux jeux vidéo en ligne comme une maladie.

3. Perméabilité des sphères réelles et virtuelles : construction d'un système d'usages

Les adolescents et adolescentes ont un usage des réseaux sociaux et de l'outil numérique que l'on peut qualifier d'intensif. Par exemple en France, en 2019 (Génération Numérique, 2019) :

- 82 % des filles et 73 % des garçons entre 11 et 18 ans sont inscrites et inscrits à un ou plusieurs réseaux sociaux, dont 56 % des 11-12 ans ;
- 64 % des 11-18 ans ont un appareil numérique en permanence avec eux ;
- 35 % d'entre eux se réveillent pour le consulter.

Dans ce contexte, l'activité virtuelle croise la vie réelle : ainsi en 2017, 50 % des filles et 60 % des garçons de 15 à 18 ans ont déjà eu des contacts avec des inconnus et près de 45 % d'entre eux les ont rencontrés physiquement (Génération Numérique, 2017). D'autre part, près de 80 % des filles et 60 % des garçons entre 15 et 18 ans utilisent leur véritable identité ainsi que de vraie photo sur leurs profils en ligne, bien qu'une grande majorité d'entre eux déclare mentir sur leur âge.

Les adolescents ainsi connectés sont exposés à des contenus choquants et/ou considérés comme inappropriés⁴⁷, à des prédateurs sexuels, à des personnalités mal intentionnées pouvant porter atteinte à leur estime de soi (y compris de leur tranche d'âge). Lorsqu'un adolescent est connecté sur un smartphone, il se trouve exposé à des dangers extérieurs au sein même d'un environnement que l'on considère souvent protégé, puisqu'il peut le faire depuis sa chambre. L'univers virtuel devient de fait l'un des liens principaux entre son intimité et l'extérieur (Tisseron, S., 2011) (Génération Numérique, 2019).

Harcèlement, diffusion de son image ou de ses données... de nouvelles inquiétudes liées aux réseaux

Contrairement à une idée communément admise, les jeunes générations (souvent dites « digital natives ») n'ont pas de compétences informatiques expertes par défaut ou de manière systématique. Ils maîtrisent essentiellement les fonctions simples (comme le téléchargement et l'utilisation d'applications mobiles) mais sont souvent incapables d'utiliser correctement un logiciel de traitement de texte ou de données (type *Word* ou *Excel*). Ils sont encore moins en mesure de comprendre la programmation de ces applications ou logiciels. Ils se retrouvent souvent démunis devant la complexité des règles de gestion de leur profil sur les réseaux sociaux, notamment lorsqu'il s'agit de restreindre ou contrôler les accès aux contenus les concernant. Ainsi 57 % des 11 à 18 ans trouvent très difficile d'effacer des contenus les concernant publiés par d'autres internautes. Et naturellement, beaucoup ont peur d'être harcelés, avoir une mauvaise réputation ou image sur internet ou d'être victime d'un piratage (Génération Numérique, 2019).

Cette surexposition modifie la perception que l'on a de soi

Certaines recherches (Rodgers, R.F., 2017) mettent en avant le fait que l'utilisation par les jeunes de certaines applications (type Snapchat ou Instagram par exemple) induit une modification de la conscience de soi : l'hypothèse principale part du postulat qu'utiliser cette application augmente les préoccupations autour de l'image corporelle et du poids. Rachel Rodgers, docteur en psychologie et professeur associée à la Northeastern University de Boston,

⁴⁷ Avec l'arrivée des smartphones, la révolution de l'accessibilité de la pornographie, par exemple, qui représente plus de 25 % du trafic mondial, continue de soulever d'importantes questions d'impact sur les adolescents et les enfants (The Shift Project, 2019).

conclut dans l'un de ses récents articles que l'exposition aux écrans influence les très jeunes filles (4-5 ans) sur leur comportement alimentaire et leur perception d'elles-mêmes.

C. Pistes de réflexion

1. Enfants et adolescents : sphère scolaire

- Sphère scolaire : quels usages pertinents des outils numériques dans l'apprentissage scolaire ? Quels usages délétères ?
- ...

2. Vie adulte : sphère professionnelle

- Effets de la surcharge informationnelle, de la sur-sollicitation (notifications, emails etc.)
- Séparation de la vie professionnelle et de la vie privée : quel rôle des technologies numériques ?
- Retours d'expérience d'entreprise sur les effets des usages numériques sur la vie au travail (productivité, qualité de vie etc.)
- ...

3. Construction des usages

- Quels mécanismes de construction des usages numériques ?
- Quels acteurs et outils pour une réflexion concertée sur les usages ?
- Quels leviers pour un système d'usages compatibles avec un système numérique résilient ?
- Quelle dimension individuelle, quelle part collective, dans la construction de nos usages numériques ?
- ...

IV. Scénarios prospectifs : modéliser les impacts des innovations majeures

A. Observations méthodologiques

Il n'existe pas aujourd'hui à l'échelle des organisations ni des Etats, de mesure précise et récurrente des impacts environnementaux des systèmes numériques⁴⁸, et donc encore moins de statistiques. Toutes les estimations de ces impacts sont donc basées sur des modèles, reposant sur des paramètres issus de mesures plus ou moins ponctuelles et le choix de variables représentatives du volume d'activités numériques.

Les modèles les plus complets (et les seuls réellement pertinents) couvrent non seulement la phase d'utilisation des systèmes numériques mais également la phase de production des équipements appelés à constituer les systèmes. Aucun modèle ne prend aujourd'hui en compte la phase de fin de vie, faute d'informations suffisamment précises.

En ce qui concerne la phase de production (« cradle to gate », en anglais), il s'agit de s'appuyer sur des volumes de production des différents types d'équipements numériques (ce qui est assez bien documenté) et sur l'empreinte environnementale unitaire de chaque type d'équipement., sur laquelle jouent beaucoup de facteurs d'incertitude : disponibilité de données d'ACV⁴⁹, variabilité des données d'ACV, dispersion des résultats compte tenu du grand nombre de modèles et de fournisseurs, décalage de plusieurs années entre les équipements pour lesquels des données d'ACV sont disponibles et les équipements en cours de production alors que les progrès technologiques sont rapides etc..

Deux grandes catégories de modèles sont utilisées, chacune caractérisée par le choix de la variable principale pour ce qui est de la phase d'utilisation des réseaux et data centers :

- Base installée des différents types d'équipements utilisés
- Volume de données circulant et stockées au sein des data centers et des réseaux

Dans le premier cas, des hypothèses doivent être prises sur l'intensité et la durée d'utilisation des équipements ainsi que sur leur puissance effective ; dans le deuxième cas, un paramètre d'efficacité énergétique (« EE ») donnant la consommation électrique par Gigaoctet traité est identifié.

Nous avons fait le choix en 2018 d'un modèle du « deuxième type », que nous conservons et cherchons à améliorer en 2020.

Comme en 2018, nous faisons le choix dans ce modèle de quantifier l'impact environnemental en privilégiant deux indicateurs : les émissions de GES et la consommation d'énergie.

B. Retour sur les scénarii élaborés en 2018

Il convient de rappeler que nous avons choisi en 2018 de **nous appuyer sur un modèle développé par Andrae et Edler** en 2015 (Andrae & Edler, 2015) et décrivant des **scénarios d'évolution de la consommation énergétique du numérique de 2010 à 2030** :

- « **best case** » : les gains d'efficacité énergétique (des équipements, des plateformes technologiques) s'accroissent et la croissance du trafic ralentit ;
- « **expected case** » : les gains d'efficacité énergétique et le taux de croissance du trafic sont conformes à l'historique 2010/2013 ;
- « **worst case** » : les gains d'efficacité énergétique sont moindres et la croissance du trafic s'accroît.

⁴⁸ Un système numérique est composé de modules terminaux interfacés avec des utilisateurs ou des machines ou des choses, d'équipements de traitement et de stockage de données localisés dans des data centers (des très petits aux très grands), et de réseaux permettant le transfert des données

⁴⁹ Analyse de Cycle de Vie

Sur cette base, nous avons défini dans notre étude de 2018 quatre scénarios pour établir nos prévisions à 2025 :

- « **Expected updated** » : nous avons gardé le même rythme de gain d'efficacité énergétique que dans le scénario « expected case », et nous avons actualisé les données de trafic uniquement sur la base des chiffres fournis par Cisco (dont notamment (Cisco, 2016)), en prolongeant les tendances au-delà de 2021.
- « **Higher growth higher EE** » : nous avons fait l'hypothèse que l'efficacité énergétique s'améliore plus rapidement à partir de 2015 et nous avons actualisé les données de trafic sur la base de l'historique fourni par Cisco et en appliquant aux prévisions d'ici 2025 le taux de croissance historique, qui s'avère plus important que dans le scénario précédent.
- « **Superior growth peaked EE** » : variante du scénario précédent, il prend en compte une légère augmentation de la croissance du trafic après 2020 par rapport à celui-ci et un pic des gains d'efficacité énergétique en 2020, notamment dans les data centers. Cette hypothèse s'appuie sur les craintes de plafonnement de la performance énergétique une fois appliquées toutes les bonnes pratiques (Shehabi, A., 2016).
- « **Sobriety** » : identique au scénario "Higher growth higher EE" jusqu'en 2020, puis ralentissement de la croissance du trafic et de la production permis par la mise en œuvre de pratiques de sobriété. Ce scénario intègre également une décélération des gains d'efficacité énergétique des data centers après 2020 afin de tester la robustesse de l'approche.

Il en ressort que **la consommation énergétique du numérique dans le monde augmente d'environ 9% par an** (période 2015 à 2020), une tendance largement supérieure au scénario moyen « expected case » prévu par Andrae et Edler (4%) et à peine inférieure à leur scénario catastrophe « worst case » (10%). Ce taux de croissance correspond à un doublement en 8 ans et est appelé à augmenter dans tous les scénarios n'intégrant pas un changement volontariste dans les pratiques de consommation (trafic, terminaux).

Consommation d'énergie en Twh	2015	2020	2025	CAGR ⁵⁰ 2015/2020	CAGR 2020/2025
Expected - 2015	2312	2878	4350	4,5%	8,7%
Worst - 2015	3677	5976	12 352	10%	15,5%
Expected updated	2389	3834	6254	9,9%	10,2%
Higher growth higher EE	2373	3622	5716	8,9%	9,5%
Superior growth peaked EE	2373	3622	7096	8,9%	14,5%
Sobriety	2373	3622	3909	8,9%	1,6%

Tableau 3 : Consommation d'énergie mondiale du numérique en TWh

[Source : [Lean ICT Materials] Forecast Model (The Shift Project, 2018). Produit par The Shift Project à partir des données publiées par (Andrae & Edler, 2015)]

Concernant la période 2020 à 2025, la comparaison des différents scénarios montre l'apparition de bifurcations :

- Une **accélération** de la croissance lorsque l'on prolonge les tendances de consommation (trafic, terminaux) et d'efficacité énergétique (réseaux et data centers),
- Une **explosion** de celle-ci si les progrès en matière d'efficacité énergétique ralentissent. Or, ce risque est réel car les technologies actuelles approchent de leurs limites et les technologies futures (processeurs quantiques par exemple) ne seront pas industrialisées à cette échéance.
- Une **stabilisation** de la consommation d'énergie par le numérique si nous parvenons à maîtriser nos pratiques de consommation (plus de sélectivité dans les usages vidéo, durée de conservation des smartphones un peu allongée), et ce malgré une concrétisation du risque de moindre augmentation de l'efficacité énergétique des infrastructures

⁵⁰ Compounded Annual Growth Rate, (ou taux de croissance composé en français). Ex : une somme qui passe de 100 à 121 en deux ans a cru (CAGR) de 10% l'an.

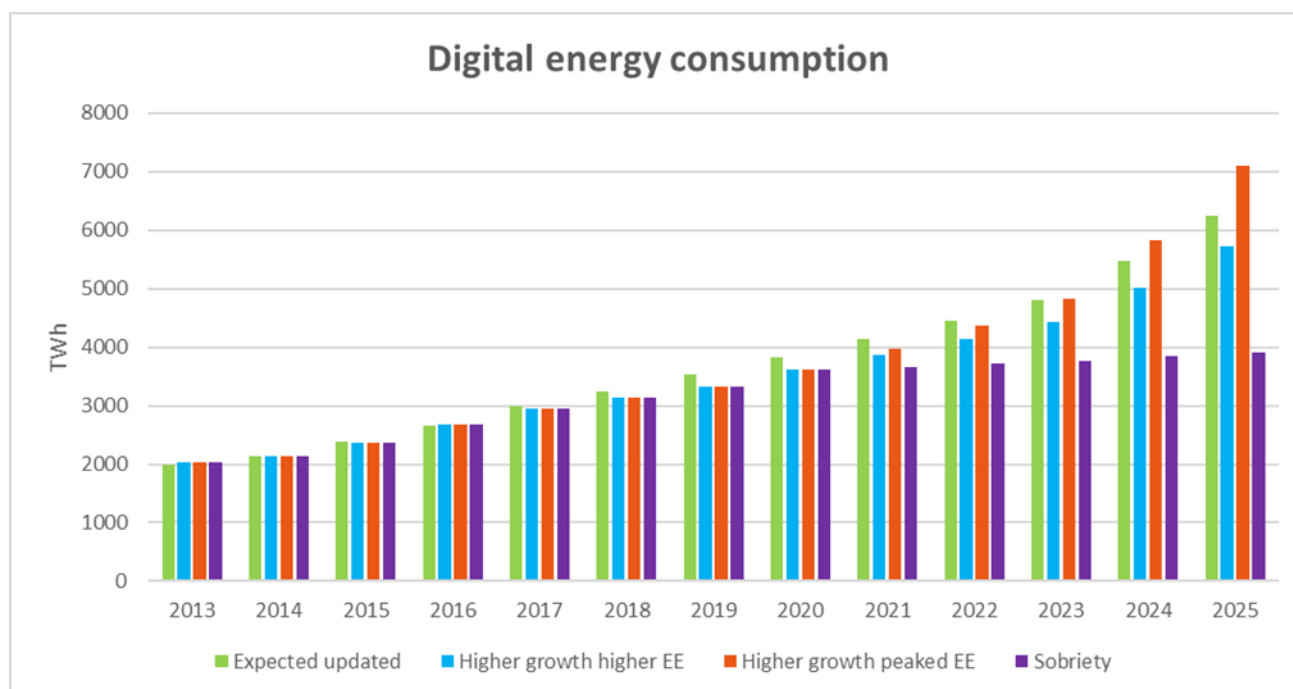


Figure 19 : Évolution 2013-2025 de la consommation énergétique du numérique en TWh

[Source : [Lean ICT Materials] Forecast Model (The Shift Project, 2018). Produit par The Shift Project à partir des données publiées par (Andrae & Edler, 2015)]

Compte tenu de la décarbonation progressive du mix électrique, le taux de croissance des émissions de GES dues au numérique est d'environ 8% ce qui est totalement contraire aux objectifs de réduction des émissions de GES tels que définis lors de la COP 21. Alors que l'on peut espérer une baisse graduelle des émissions de GES totales à partir de 2020, la part du numérique dans ces émissions va continuer à augmenter et pourrait donc **doubler d'ici 2025 pour atteindre 8%**.

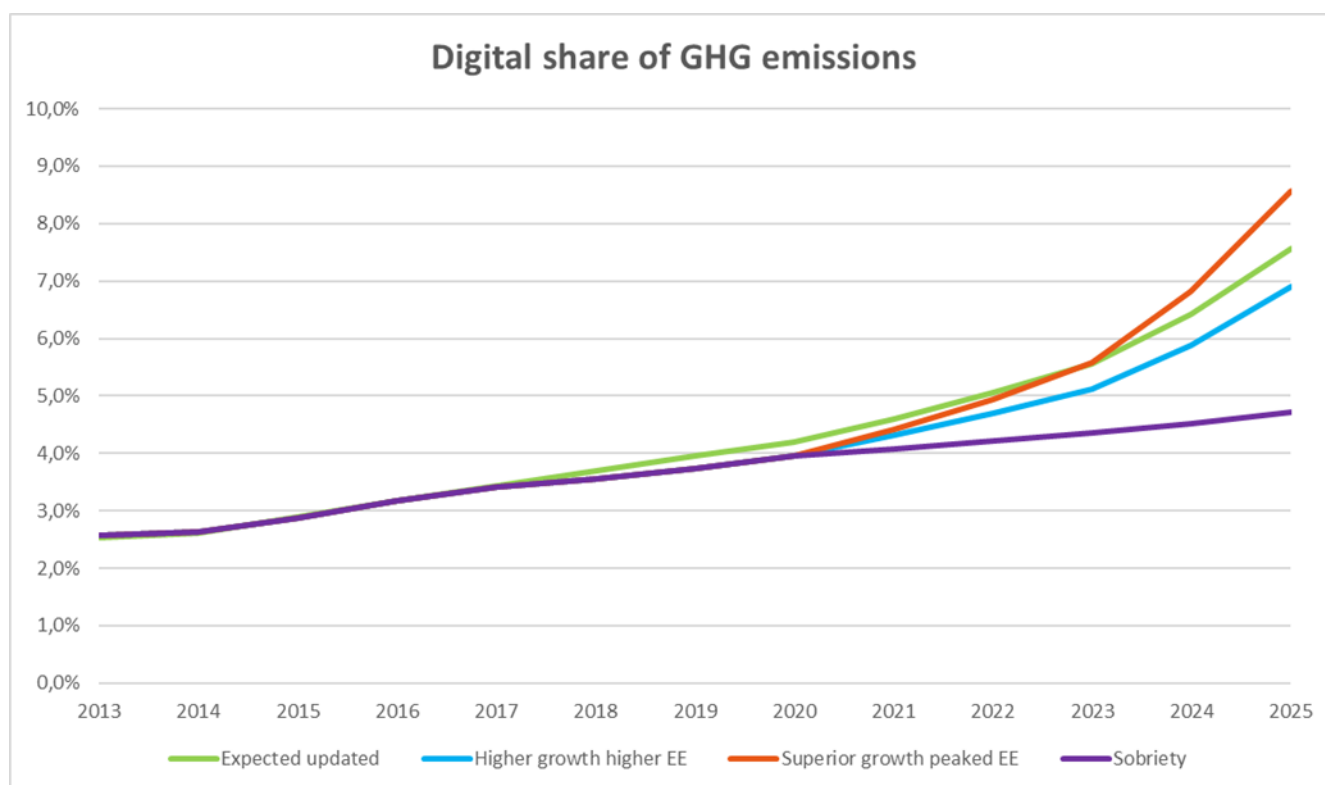


Figure 20 : Évolution 2013-2025 de la part du numérique dans les émissions de GES

[Source : [Lean ICT Materials] Forecast Model (The Shift Project, 2018). Produit par The Shift Project à partir des données publiées par (Andrae & Edler, 2015)]

La phase de production des équipements occupe une part très significative, environ 45% en 2017, dans l'empreinte énergétique totale du numérique, ainsi que dans les émissions de GES qui en découlent.

Un utilisateur de smartphone (s'il garde son appareil deux ans) verra ainsi la consommation énergétique totale induite au cours du cycle de vie de cet équipement se réaliser à 90% avant même son achat⁵¹. Ce poids de la phase de production dans l'impact énergétique est de l'ordre de 60% pour une télévision connectée mais est bien supérieur à 80% pour un ordinateur portable.

Une bonne partie des enjeux environnementaux du numérique n'est donc pas liée à l'usage que l'on en fait, mais en grande partie au volume de matériel produit, à son processus de production, et à sa durée de vie.

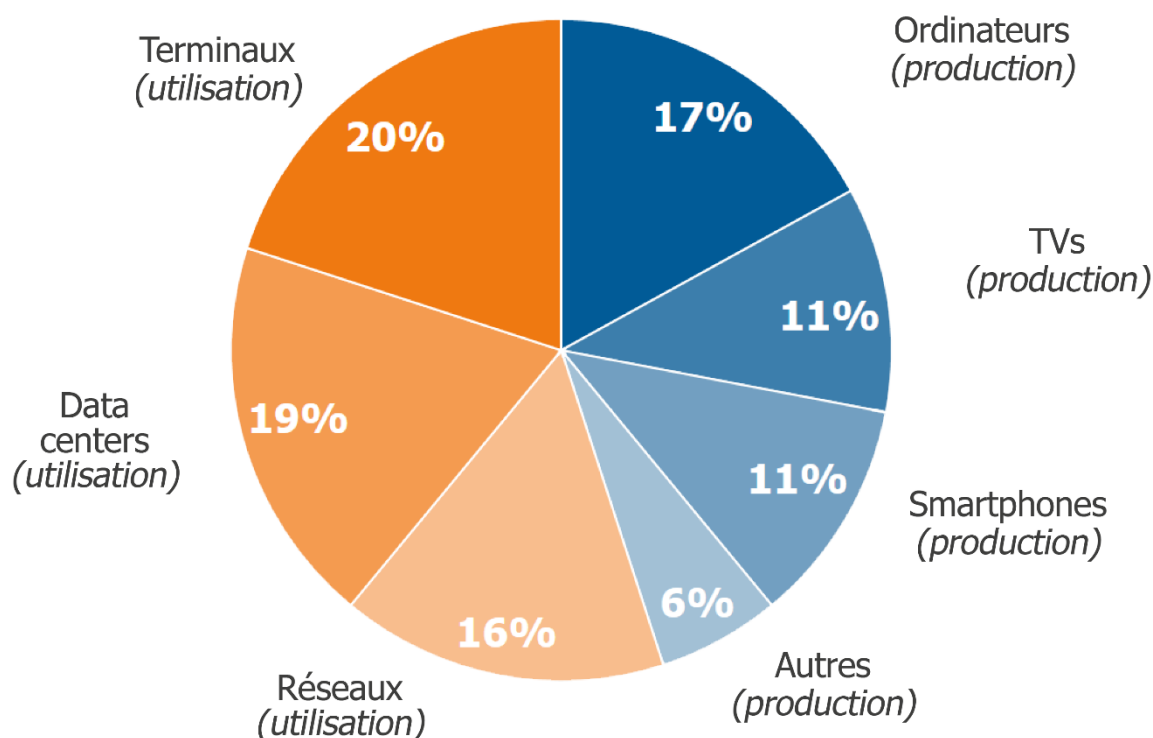


Figure 21 - Distribution de la consommation énergétique du numérique par poste pour la production (45 %) et l'utilisation (55 %) en 2017
[Source: (The Shift Project, 2018)]

Parmi les facteurs de croissance de la consommation énergétique du numérique, nous en avons identifié et analysé trois présents à travers la phase de production :

- le phénomène smartphone, devenu objet de consommation courante dans les pays développés et vecteur principal d'accès future à Internet pour la moitié de la population mondiale non encore connectée,
- la multiplication des périphériques de la vie quotidienne (ou « connected living »),
- l'essor de l'internet des objets industriels (ou IIoT, Industrial Internet of Things), s'ajoutant à l'explosion du trafic de données impactant la phase d'utilisation et principalement due à des usages vidéo immodérés et indifférenciés.

⁵¹ Nous parlons bien ici de la consommation électrique propre du smartphone : si l'on prend en compte également le surcroît de consommation électrique du réseau occasionné par l'utilisation du smartphone, la proportion est plutôt de l'ordre de 50% (The Shift Project, 2018).

C. Modélisation

Outre le fait de **rafraîchir les données** d'entrée (de production d'équipements, de trafic, de parc de terminaux etc), il est question dans cette mise à jour de nos scénarii prospectifs de mettre en évidence de façon quantitative l'impact environnemental direct⁵² des **innovations** (techniques ou d'usages) considérées comme majeures par le secteur du numérique pour les années à venir :

- l'Internet des Objets (IoT) dans ses déclinaisons grand-public autant qu'industrielles
- l'Intelligence Artificielle
- le déploiement de réseaux mobiles 5G
- la mise en place de capacités de traitement et de stockage des données à l'Edge⁵³

Idéalement, il s'agit de pouvoir associer à chacune de ces innovations, et de façon quantitative, des conséquences sur les volumes d'activités numériques (exemple : l'IA conduit à augmenter la charge de calcul et le stockage de données (big data) dans les data centers) et/ou sur les paramètres d'efficacité énergétique (exemple : la déformation du cloud en « core cloud » et « edge cloud » tend plutôt à ralentir l'augmentation de l'efficacité énergétique des data centers mais ralentit également l'augmentation du trafic sur la partie « core » des réseaux), afin de les intégrer dans le modèle, ou, à tout le moins, de pouvoir mieux apprécier la probabilité des différents scénarii.

A ce stade, nous avons identifié un certain nombre de questions-clés auxquelles il sera nécessaire de répondre pour confirmer (ou infirmer) et quantifier les conséquences environnementales de chacune de ces innovations, telles que nous pouvons aujourd'hui les anticiper, sur la base de cas particuliers ou d'études dont nous avons connaissance.

L'Internet des Objets (IoT)

Ce que nous anticipons : la logique de déploiement « tous azimuts » de l'IoT conduit à l'échéance 2030 à une augmentation d'un ordre de grandeur du parc de terminaux connectés par rapport à 2010, ainsi que de la production annuelle d'objets numériques connectables.

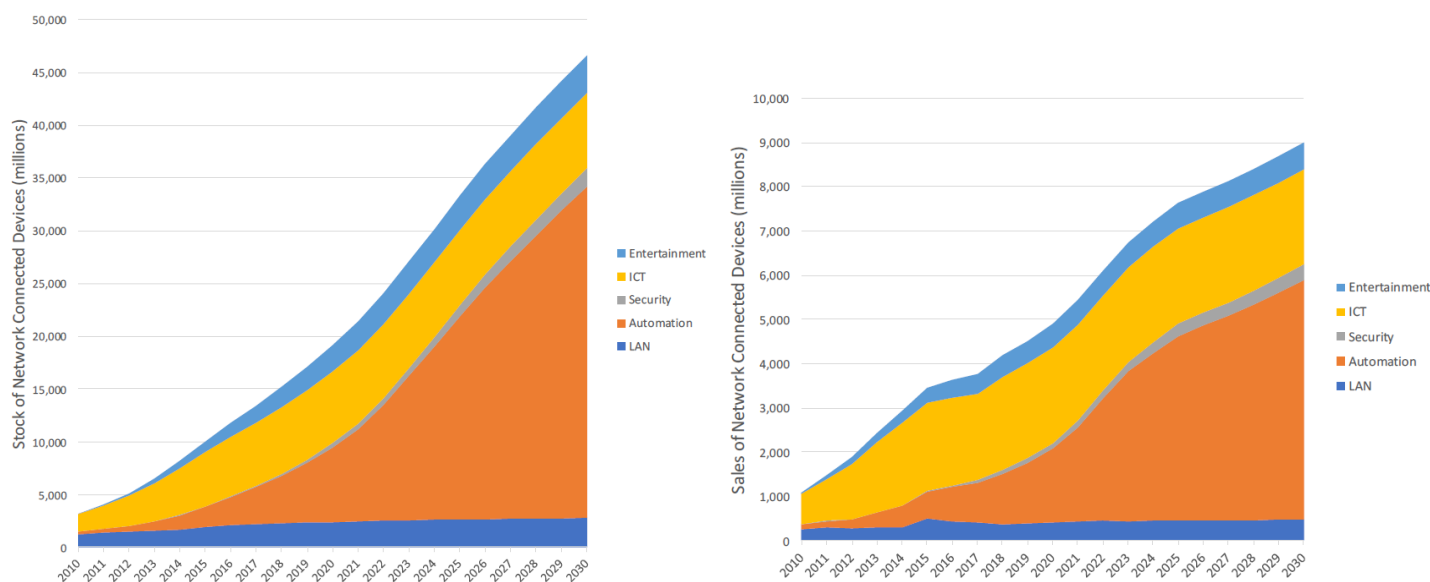


Figure 22 – Parcs (figure de gauche) et ventes (figure de droite) d'objets connectés entre 2010 et 2030
[Source : (EDNA, 2019)]

⁵² Certaines de ces innovations ont un impact indirect, qui n'entre pas dans cet exercice de modélisation ; les résultats attendus de l'étude de projets « smart » pourront fournir une première évaluation.

⁵³ La notion d'Edge est encore assez floue mais elle qualifie une architecture plus décentralisée que celle du Cloud actuel ; il s'agit de disposer de capacités de traitement et de stockage des données relativement proches des points de génération des données, qui se décuplent avec l'IoT. Une telle architecture permet de réduire la latence pour des applications où celle-ci est critique et de limiter la congestion des réseaux en évitant de faire passer tous les flux par des data centers centraux.

L'impact de l'utilisation de ces objets sur la consommation électrique est réel mais relativement faible compte tenu de la très faible puissance électrique unitaire, mais la véritable conséquence est à regarder du côté de l'énergie consommée pour produire ces objets.

Les questions qui se posent :

- Consolider à périmètre identique les prévisions de parc et de production d'objets connectés et leur répartition par usage final, sachant que les estimations pour 2030 varient de 20 milliards à 100 milliards
- Disposer d'une estimation de l'énergie embarquée dans un circuit intégré et modéliser l'énergie embarquée dans les différents types d'objets connectés à partir de leur degré de complexité et de leur structure
- Disposer d'une estimation de l'évolution de cette énergie embarquée unitaire d'ici 2025/2030

L'Intelligence Artificielle

Ce que nous anticipons : l'IA repose aujourd'hui sur des techniques structurellement énergivores puisque basées sur un principe de « deep learning » ou d'apprentissage automatique, où la qualité des résultats produits par un modèle va directement résulter de la quantité de données auxquels ce modèle aura été « confronté ». L'augmentation très significative des performances de ces modèles ces dernières années est intrinsèquement liée au recours à des puissances de calcul et à des capacités de stockage de données qui n'étaient pas jusque-là mobilisables. Un recours massif et généralisé à des modules d'intelligence artificielle intégrés dans des produits ou des outils est de nature à pousser à la hausse de la consommation énergétique des data centers et à une augmentation de la part des entreprises « non nativement numériques » dans la consommation globale.

Les questions qui se posent :

- Définir des indicateurs de « l'activité » IA dans les data centers
- Modéliser la consommation énergétique d'un module d'IA
- Disposer de scénarii de diffusion de ces modules d'ici 2025/2030

Le déploiement de réseaux mobiles 5G

Ce que nous anticipons : la raison essentielle, bien que non publiquement mise en avant, du déploiement de la 5G est que les réseaux mobiles 4G dans les zones les plus denses ne pourront pas écouler le volume de trafic prévu à un horizon de quelques années, celui-ci augmentant à un rythme proche de 50 % par an. Les équipements 5G du réseau d'accès radio pouvant traiter un trafic supérieur d'au moins un ordre de grandeur par rapport aux équipements 4G, ils éviteront effectivement à cette échéance toute pénurie de capacité réseau. Mais, consommant deux à trois fois plus que les équipements 4G, tout ceci se fera avec au moins un doublement de la consommation électrique des réseaux mobiles. Par ailleurs, l'essentiel de la croissance du trafic se fera sur des usages de loisirs (streaming de vidéos 3D, réalité virtuelle) qui n'ont aucune chance de correspondre par ailleurs à des gains de consommation énergétique.

Les questions qui se posent : il s'agit essentiellement de pouvoir estimer de façon fiable les puissances moyennes consommées par un même site lorsqu'il assure la couverture en employant les différentes générations de technologie (2G, 3G, 4G, 5G) ou en les combinant (sachant que le décommissionnement d'une technologie ancienne intervient au mieux quelques années après le déploiement de la technologie la plus récente).

Pour le moment, nous nous appuyons sur les données suivantes :

Puissances moyennes (Huawei, 2019) :

- Site hybride 2G/3G/4G : 6 kW
- Site hybride 3G/4G/5G : 14 kW
- Site 4G : 2 kW
- Site 5G : 6 kW

Il s'agit également de préciser le degré de couverture assuré en 5G, sachant qu'il faut « k » fois plus de sites 5G que de sites 4G mais que la valeur de « k » dépend de la bande de fréquence utilisée ainsi que de la qualité de service visée (par exemple, utilisation de la 5G comme desserte alternative à la fibre optique pour certains habitats résidentiels).

Enfin, il s'agit de déterminer s'il y a lieu de prendre en compte dans la modélisation l'impact de l'introduction de la 5G et de nouvelles architectures (Multi-access edge computing (MEC), Cloud RAN (C-RAN)) sur les autres composantes du réseau en matière de consommation électrique: backhaul, core, etc.

La mise en place de capacités de traitement et de stockage des données à l'Edge

Ce que nous anticipons : la raison essentielle, bien que là aussi rarement mise en avant, de la notion « d'edge computing » est l'apparition à échéance de quelques années de congestion des réseaux, non plus d'accès comme pour la 5G, mais d'acheminement du trafic vers et à partir des data centers. Ceux-ci évoluant vers des structures de plus en plus énormes (hyper ou méga data centers) hébergeant des applications générant des trafics unitaires toujours plus volumineux (vidéo HD, 4K, 8K etc, online gaming, réalité virtuelle), il devient de plus en plus coûteux et difficile de se contenter de l'architecture centralisée du « cloud » telle qu'elle s'est mise en place depuis quelques années. Le développement de l'IoT en multipliant les sources de création de données accroît cette pression à laquelle s'ajoute le besoin de réduire les délais de traitement et donc de transport de certaines de ces données lorsqu'elles alimentent des applications « temps réel ». Il est donc nécessaire de déconcentrer voire décentraliser le traitement et/ou le stockage des données dans des équipements plus proches des utilisateurs (hommes ou machines), d'où le concept « d'edge computing » ou « d'edge cloud », s'accompagnant d'un concept de « core cloud » ou « central cloud », voire de « distributed cloud ». Ni le vocabulaire ni l'architecture qui le sous-tend ne sont complètement stabilisés mais globalement et pour le sujet qui nous concerne ici, on va assister à deux, voire trois évolutions simultanées :

- la poursuite de l'essor des hyper data centers se substituant à des data centers d'entreprises
- l'éclosion de très nombreux micro data centers souvent associés à une application ou un bouquet d'applications spécifiques
- et probablement le déploiement de data centers « intermédiaires » assurant un rôle d'agrégation et de traitement des données

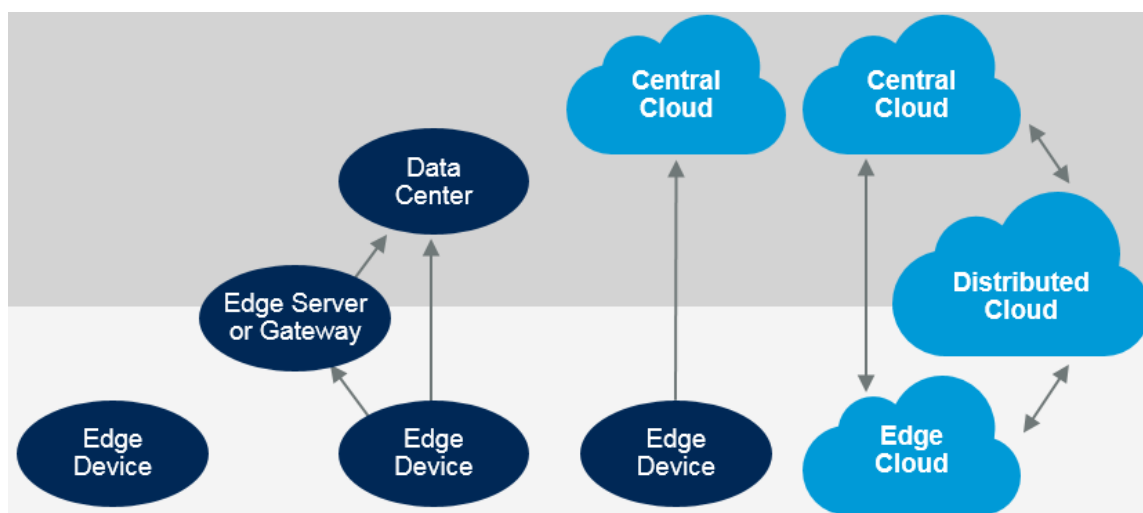


Figure 23 – Evolution vers l'Edge Cloud
[Source : (Gartner, 2018)]

In fine, le nombre de serveurs utilisés devrait donc continuer à augmenter (le rythme actuel est de 8 % par an) et l'efficacité énergétique à tout le moins stagner.

Les questions qui se posent :

- Dans quelle mesure l'edge computing va-t-il « doper » la production de serveurs au-delà de la croissance actuelle ?
- Quel impact sur l'évolution du PUE⁵⁴ moyen ?
- Quel impact sur la topologie des réseaux et sur le « découpage » entre réseaux et data centers, sachant que les nœuds de réseau pourraient aussi être des instances de type « edge cloud » ?

⁵⁴ Power Usage Effectiveness : mesure la part d'énergie consommée par un data center au-delà de l'énergie directement consommée par les équipements informatiques ou de réseau

Synthèse et suite des travaux

A. Suite des travaux

1. Axe : évaluer et renforcer la pertinence environnementale des projets numériques au sein des villes connectées

A ce stade, les travaux menés ont permis de tester notre approche sur une technologie, celle de l'éclairage connecté.

Plusieurs conclusions quantitatives commencent à confirmer le fait que prendre en compte l'infrastructure entière (capteurs, luminaires, contrôleurs et systèmes de connexion et dialogues) dans sa phase de production et d'utilisation peut changer drastiquement les conclusions quant à la pertinence énergétique d'une couche intelligente.

L'objectif des travaux en cours et de leurs prochaines étapes s'articule en trois axes principaux :

- **Mener la réflexion à son terme sur l'éclairage connecté**, en complétant et consolidant les données et modélisations.
- **Étendre la méthodologie à deux autres technologies** :
 - **La voiture connectée/autonome** : l'ambition est de poser les questions systémiques – du point de vue du numérique – liées à la mise en place de la mobilité autonome dans un tissu urbain réel : quelles infrastructures numériques et réseaux, quels volumes de données, quels bilans énergétiques et carbone pour la mise en place et l'exploitation de l'ensemble ?
 - **Le compteur communicant et le réseau électrique intelligent** : l'ambition est d'explorer les applications du compteur communicant (notamment en termes d'effets sur les habitudes de consommation des individus) ainsi que les questions systémiques liées à la couche intelligente de systèmes électriques comme les *smart grids* : quels objectifs, quels apports, quelles implications en termes de consommation énergétique de la couche intelligente elle-même et de son impact de production ?
- **Établir des recommandations méthodologiques générales** : croiser les approches développées sur les trois technologies susmentionnées permettra de construire une vision systémique d'un cas d'étude qualitatif d'une « ville connectée », sur lequel pourront être ébauchées les méthodologies à adopter pour prendre en compte de manière pertinente et quantitative les interactions entre les stratégies numérique et énergétique d'un territoire ou de l'un de ses sous-ensemble (entreprises, ménages etc.). Ces recommandations viseront à être utilisables non seulement au sein des pays développés mais également au sein des pays en développement, où ce type de projets se multiplient.

2. Axe 2 : piloter la transformation numérique d'une organisation pour rendre son système informatique soutenable

Compte tenu de l'omniprésence du numérique au sein des entreprises et de leurs processus de fonctionnement, le référentiel de pilotage se doit d'être le plus holistique possible pour avoir une efficacité systémique.

Il s'agit de disposer d'une méthodologie et d'outils permettant d'activer l'ensemble des leviers disponibles, autour des usages et des processus métiers, autour de l'architecture applicative et logicielle du SI et autour de l'architecture technique, c'est-à-dire des infrastructures de stockage, de traitement, réseaux.

Le travail conduit jusqu'ici a permis de structurer cette approche, qu'il convient maintenant de compléter :

- En construisant des passerelles avec des cadres méthodologiques existants (Architecture d'Entreprise, méthodes « agiles » etc.)
- En positionnant au sein de cette « méta approche » les méthodes et outils de type « green IT »
- En décrivant un scénario de transformation, permettant de rendre cette approche légitime, opératoire et efficace.

Tout ceci en dialogue avec des acteurs de référence (Cigref, INR, AGIT, collectif GreenIT.fr, Ademe, The Open Group, etc.) afin de créer les meilleures conditions possibles pour une mise en pratique efficace.

3. Axe 3 : explorer et comprendre les articulations entre usages humains et outils numériques

A ce stade, les travaux menés ont permis de rassembler un premier socle de données et d'études permettant de caractériser les effets de la consommation du numérique telle qu'elle est construite aujourd'hui sur le développement de l'enfant.

L'objectif des prochaines étapes du travail s'articule en trois axes essentiels :

- **Étayer le socle de données sur les effets de nos usages numériques** : l'ambition est de construire une vision panoramique des questionnements déjà à l'œuvre quant à notre consommation d'outils numériques telle qu'elle existe aujourd'hui, au travers de ses effets sur la santé, de ses effets sur le développement des individus, de ses autres dimensions sociétales.
Trois dimensions seront explorées :
 - La vie de l'enfant, dans le cadre scolaire ;
 - La vie de l'adulte, dans le cadre de sa vie privée ;
 - La vie de l'adulte, dans le cadre de sa vie professionnelle.
- **Décrire les mécanismes de construction des usages numériques** : il s'agira de comprendre la manière dont se construisent nos habitudes de consommation individuelles et de replacer ces mécanismes dans les dynamiques collectives à l'œuvre. Cela permettra de cartographier les axes à explorer, les outils déjà à disposition et les acteurs à convoquer pour poser la question des usages, de manière efficace et sur la base objective la plus large possible.
- **Caractériser la sobriété numérique en termes d'usages** : par la compréhension des enjeux liés aux usages et de leurs mécanismes de construction, l'ambition est de décrire les interactions de la sobriété numérique avec ces problématiques. Cela permettra d'identifier les axes de réflexion à mener pour construire des leviers efficaces de changement des usages.

4. Axe 4 : fournir un éclairage prospectif des conséquences de choix technologiques majeurs

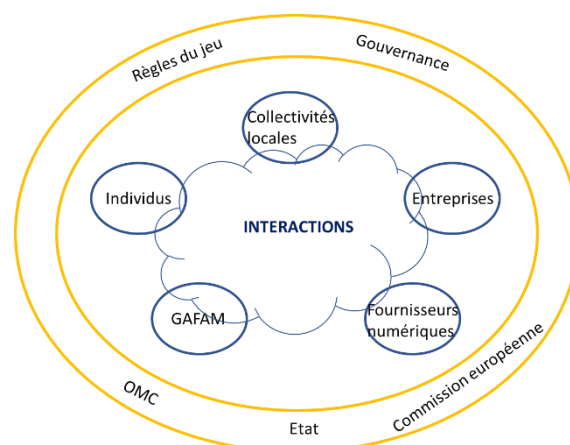
Les travaux conduits jusqu'ici ainsi que les ateliers du 16 janvier permettront de poser les bases nécessaires à la modélisation de l'impact de l'IoT, de l'IA, de la 5G et de « l'edge computing » sur la consommation énergétique et les émissions de GES du numérique. Il s'agira ensuite de disposer de données vérifiées pour effectuer des simulations et de partager avec des auteurs de référence sur ces sujets en France et à l'International pour constituer des points de référence utilisables pour calibrer le déploiement de ces technologies.

B. Conclusions générales

Les constats établis dans nos précédents travaux ont alimenté, notamment grâce à la production de chiffres, une prise de conscience de l'importance de l'empreinte environnementale du numérique, de son augmentation préoccupante et des raisons systémiques qui conduisent à cette situation.

S'il est nécessaire de poursuivre les efforts de sensibilisation en la matière, il est tout aussi important de montrer qu'il est possible de passer des constats à l'action, elle aussi systémique, visant donc à ce que les différents acteurs interconnectés au sein du système puissent conjointement évoluer dans un sens permettant de contenir l'envolée de la consommation d'énergie et de matériaux du numérique.

Dans ce cadre, il est nécessaire de cibler des leviers permettant d'inciter les différents acteurs à opérer les changements nécessaires.



Sans prétendre à l'exhaustivité, c'est ce que nous essayons de faire à travers les différents chantiers en cours :

- Axe 1 « Analyse de projets smart » : Démythifier les approches « smart » en montrant aux acteurs publics (collectivités locales) et privés (entreprises, ménages) que des conditions doivent être remplies pour que leurs impacts environnementaux aient une chance d'être positifs ;
- Axe 2 « Réduire l'impact environnemental du Système d'Information » : Intégrer la prise en compte de la dimension environnementale dans les outils et dans la gouvernance de la transformation numérique des entreprises ;
- Axe 3 « Construction des usages numériques » : Identifier les ressorts psycho-sociétaux de la consommation numérique pour alimenter l'élaboration de politiques publiques (information, incitation, réglementation) favorisant des comportements environnementalement responsables ;
- Axe 4 « Scénarios prospectifs » : Éclairer les conséquences environnementales d'innovations technologiques tout à la fois structurantes et portées par les courants de pensée dominants.

Au-delà des chantiers supplémentaires que nous pourrions lancer et de ces chantiers déjà en cours qui, bien que complexes, sont de l'ordre de la **mise en œuvre** de leviers de changement, il nous semble indispensable qu'un débat politique et démocratique puisse s'engager en amont sur la place, le rôle et la **finalité** de la technologie, et tout particulièrement le numérique, dans nos sociétés.

Par exemple, alors que le déploiement de la 5G est prévu au second semestre de cette année 2020, nous souhaitons que nos travaux puissent alimenter une discussion approfondie et transparente sur ses objectifs, ses conséquences et ses modalités à la lumière de ses impacts environnementaux et sociétaux.

Enfin, et c'est l'un des objectifs principaux des Ateliers que nous organisons le 16 janvier 2020, le travail derrière ce rapport intermédiaire continue. Dans cette logique, nous vous prions d'envoyer vos remarques, critiques et propositions à l'adresse mail pilotes-gt-lean-ict@theshiftproject.org, qui regroupe les pilotes des 4 axes du présent rapport (Axe 1 : Maxime Efoui-Hess ; Axe 2 : Céline Lescop ; Axe 3 : Laurie Marraud, Maxime Efoui-Hess ; Axe 4 : Hugues Ferreboeuf). Votre contribution est importante pour nous, et permettra d'enrichir et affiner notre travail.

Annexes

A. Annexe 1 • Analyse des projets « smart »

1. Formalisation mathématique de la pertinence énergétique (détails de calcul)

Afin de pouvoir évaluer la pertinence de l'introduction d'une couche smart dans un environnement, une fonction de coût global $G(t)$ peut être définie (adapté de (Kumar T., 2017)) :

$$G(t) = E_{light,savings}(t) - E_{smart}(t) - E_{bulb,embodied}(t)$$

Cette fonction évalue, en fonction du temps, le gain énergétique global réalisé en tenant compte :

- De la diminution de consommation énergétique permise par l'introduction de la couche smart (meilleure gestion de l'infrastructure) – cette diminution est proportionnelle à la consommation énergétique initiale du système d'éclairage :

$$E_{light,savings}(t) = \int_0^t (P_{bulb,light} - P_{smart,light}) dt = E_{bulb,light} - E_{smart,light} = E_{bulb,light} \left(1 - \frac{E_{smart,light}}{E_{bulb,light}} \right) = E_{light,ini} \cdot \alpha$$

, où α est appelé « coefficient d'économie d'énergie ».

- De l'énergie de fonctionnement ainsi que de l'énergie grise nécessaire pour produire les différents éléments de cette couche smart :

$$E_{smart}(t) = E_{smart,embodied}(t) + E_{smart,funct}(t)$$

- De l'énergie embarquée dans l'ampoule en elle-même (sans la couche smart) rapportée à la durée de vie et d'utilisation de l'ampoule :

$$E_{bulb,embodied}(t) = E_{bulb,embodied} \cdot \int_0^t \frac{1}{T_{lifebulb}}$$

, soit :

$$E_{bulb,embodied}(t) = E_{bulb,embodied} \cdot \frac{1}{T_{lifebulb}} \cdot t$$

L'analyse de cette fonction permet d'obtenir le point dit de neutralité énergétique, qui correspond au temps d'amortissement, ou temps de récupération, à partir duquel les économies permises par l'introduction de la couche intelligente compensent le coût énergétique de sa production et de son exploitation.

Ce point de neutralité énergétique est défini par $G(T_{PB}) = 0$, où T_{PB} est le temps de récupération (i.e. « *payback time* ») mentionné précédemment. Par conséquent, plus la valeur de T_{PB} est faible plus il est intéressant d'introduire une couche smart dans l'environnement considéré.

2. Technologies considérées dans le cas d'étude n°1

a. Ensemble IKEA

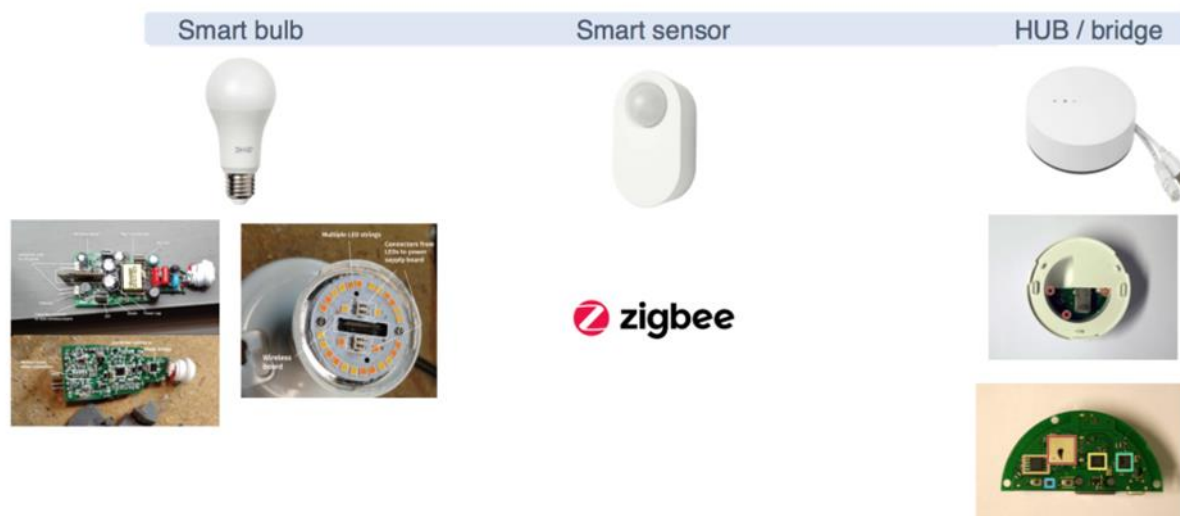


Figure 24 – Ensemble « TRÅDFRI » par IKEA

[Sources : (IKEA, bulb, 2019) (IKEA, sensor, 2019) (IKEA, bridge, 2019) (iFixIt, 2019) (Teschler, L., 2019)]

Element	Phase de production (en kWh)	Energie en utilisation (en kWh)	Commentaires
Ampoule « Smart bulb »	0.278	4.38	→ Max 0.5 W en mode veille → 0.5 W en mode ON → 1 puce considérée (1 MJ/puce)
Capteur « Smart sensor »	0.278	0.0019	→ 2 piles AAA avec durée de vie 2 ans (1.87 Wh / pile) → 1 puce considérée (1 MJ/puce)
Contrôleur « HUB / bridge / pont »	0.556 0.3089	5.91	→ Max 0.63 W en mode veille → 5 W en monde ON → 2 puces considérées (1 MJ/puce) → Circuit imprimé considéré
Total (en kWh)	1.42	10.29	-
Total (en MJ)	5.11	37.05	1 kWh = 3.6 MJ

Tableau 4 - Valeurs retenues pour l'ACV de l'ensemble IKEA

[Sources : (IKEA, bulb, 2019) (IKEA, sensor, 2019) (IKEA, bridge, 2019)]

b. Ensemble Philips

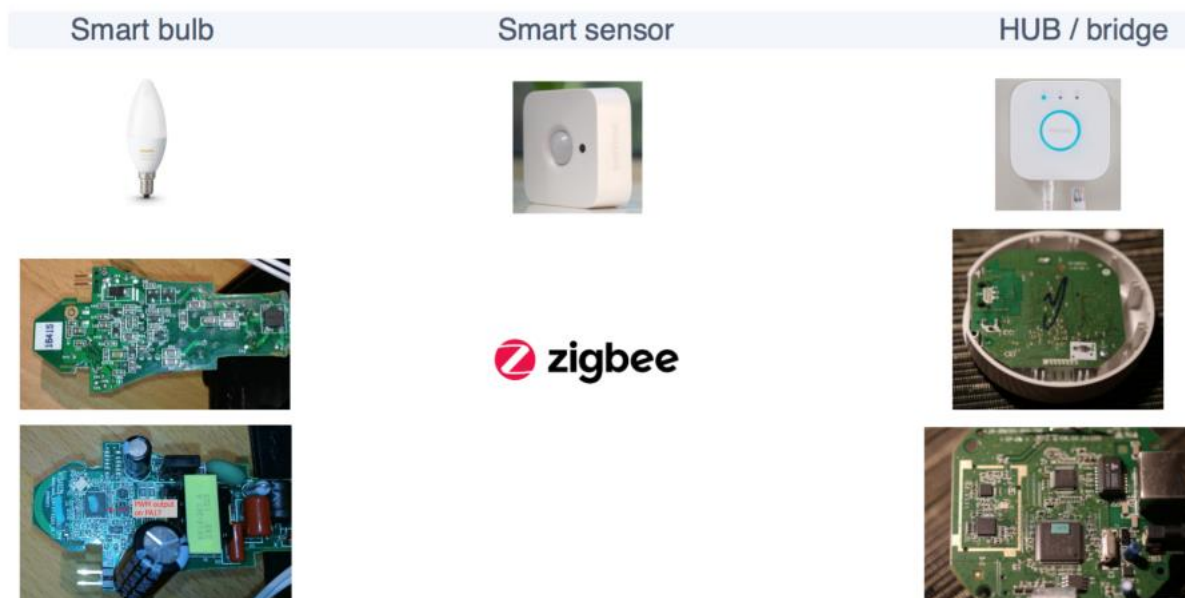


Figure 25 - Ensemble « HUE » par Philips
[Sources : (Philips, bulb, 2019) (Philips, sensor, 2019) (Philips, bridge, 2019) (ANandTech, 2019)]

Element	Phase de production (en kWh)	Energie en utilisation (en kWh)	Commentaires
Ampoule « Smart bulb »	0.278	3.51	→ Max 0.4 W en mode veille → 0.4 W en mode ON → 1 puce considérée (1 MJ/puce)
Capteur « Smart sensor »	0.278	0.0019	→ 2 piles AAA avec durée de vie 2 ans (1.87 Wh/pile) → 1 puce considérée (1 MJ/puce)
Contrôleur « HUB / bridge / pont »	0.833 0.31	0.98	→ Max 0.1 W en mode veille → 1.25 W en mode ON → 3 puces considérées (1 MJ/puce) → Circuit imprimé considéré
Total (en kWh)	1.70	4.49	-
Total (en MJ)	6.11	16.15	1 kWh = 3.6 MJ

Tableau 5 - Valeurs retenues pour l'ACV de l'ensemble IKEA
[Sources : (Philips, bulb, 2019) (Philips, sensor, 2019) (Philips, bridge, 2019)]

3. Paramètres utilisés pour l'analyse de la fonction de coût $G(t)$

Paramètre	Valeurs (différents cas)	Détails
Production	• 1.43 MJ • 5.11 MJ • 106.11 MJ	• 0.08 MJ/puce (ITRES, 2019) • 1 MJ/puce (Bol, D. et al., 2013) • 21 MJ/puce (Rycroft, M., 2008) (Williams, E., D., Ayres, R., U., Heller, M., 2002) (De Decker, K.) + Circuit imprimé (Yung, W., KC et al., 2018)
Energie en utilisation	• 15.79 MJ/an • 16.15 MJ/an • 49.46 MJ/an	• ratio 100 – 0% veille-ON • ratio 99 – 1% veille-ON (Bol, D. et al., 2011) • ratio 90 – 10% veille-ON (Bol, D. et al., 2011)
Temps de vie	• LED : 25.000 h • CFL : 10.000 h • INC : 1.000 h	(OSRAM Opto Semiconductors GmbH, 2009)
Puissance	• LED : 8 W • CFL : 13 W • INC : 60 W	Pour un flux d'environ 800 lm (ArchDaily, 2019)
Temps d'utilisation maximum par jour	10 h	Cela pose des limites réalistes sur l'utilisation des luminaires dans une maison (Martirano, L., 2011). A noter qu'un minuteur est alors nécessaire en pratique pour s'en assurer.
Energie grise pour une ampoule	• LED : 10.8 MJ • CFL : 4.46 MJ • INC : 0.67 MJ	Seule la phase de production est prise en compte (OSRAM Opto Semiconductors GmbH, 2009)

Tableau 6 - Paramètres utilisés pour obtenir le temps de récupération T_{PB}

Bibliographie

- AFE. (2018). *Eclairage dans les collectivités: vous avez questions ?* Association Française de l'Eclairage.
- AIE (Agence Internationale de l'énergie). (2019). *World Energy Outlook (WEO)*. AIE. Récupéré sur <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2018>
- American Psychological Association. (2013). *Diagnostic and statistical manual of mental disorders – Fifth Edition (DSM 5)*. ISBN: 978-0-89042-554-1.
- ANandTech. (2019). <https://www.anandtech.com/show/6805/philips-hue-automatedhome-lighting-gets-colorful/4>. Visited on 24/12/2019.
- ANandTech. (s.d.). <https://www.anandtech.com/show/6805/philips-hue-automatedhome-lighting-gets-colorful/3>. Visited on 24/12/2019.
- Andrae, A., & Edler, T. (2015). On Global Electricity Usage of Communication Technology: Trends to 2030. *Challenges*, 117 - 157.
- ArchDaily. (s.d.). <https://www.archdaily.com/897277/how-to-determine-how-many-led-lumens-youll-need-to-properly-light-your-space>. Visited on 24/12/2019.
- Bihouix, Ph., Mauvilly, K. (2016). *Le désastre de l'école numérique*. Seuil.
- Birken, C. (2017). *Handheld screen time linked with speech delays in young children*. Presented at the 2017 Pediatric Academic Societies (PAS) Meeting, San Francisco, CA, 04-May-2017.
- Bol, D. et al. (2011). *Application-aware LCA of semiconductors: Life-cycle energy of microprocessors from high-performance 32nm CPU to ultra-low-power 130nm MCU*. Proceedings of the 2011 IEEE International Symposium on Sustainable Systems and Technology. IEEE. pp. 1–6.
- Bol, D. et al. (2013). *Sleep walker: A 25-MHz 0.4-V Sub-mm² 7-microW/MHz Microcontroller in 65-nm LP/GP CMOS for Low-Carbon Wireless Sensor Nodes*. Solid-State Circuits, IEEE Journal of. 48. 20-32. 10.1109/JSSC.2012.2218067.
- Brockman P. E. et al. (2016). *Impact of TV on the quality of sleep in preschoolchildren*. Sleep Med, 20.
- Byeon H. et al. (2015). *Relationship between television viewing and language delay in toddlers*. PLoS One, 10.
- Carter B. et al. (2016). *Association between portable screen-based media device access or use and sleep outcomes*. JAMA Pediatrics, 170.
- Chellavel Ganapathi K. et al. (2017). *A study on prevalence of myopia and its associated factors in school children of Salem, Tamil Nadu*. International journal of community medicine and public health. 2017 Aug ; 4(8). doi: <http://dx.doi.org/10.18203/2394-6040.ijcmph20173114>.
- Chiado L. M. et al. (2007). *Blood lead levels and specific attention effects in young children*. Neurotoxicol Teratol, 29.
- Chonchaiya W. et al. (2008). *Television viewing associates with delayed language development*. Acta Paediatrica, 97.
- Cisco. (2016). *Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2015–2020*. https://www.cisco.com/c/dam/m/en_in/innovation/enterprise/assets/mobile-white-paper-c11-520862.pdf.
- Credoc. (2019). *BAROMÈTRE DU NUMÉRIQUE 2019 - Enquête sur la diffusion des technologies de l'information et de la communication dans la société française en 2019*. Paris: ARCEP, CGE et Mission société numérique.
- De Decker, K. (s.d.). *Low Tech Magazine*. <https://www.lowtechmagazine.com/2009/06/embodied-energyof-digital-technology.html>. Visited on 24/12/2019.

- DesignLifeCycle. (s.d.). <http://www.designlife-cycle.com/raspberry-pi>. Visited on 24/12/2019.
- Desmurget, M. (2013). *TV Lobotomie. J'AI LU*.
- Desmurget, M. (2019). *La Fabrique du Crétin Digital*. Seuil.
- Dieu Osika, S. (2018). *Les écrans : mode d'emploi pour une utilisation raisonnée en famille*. Hatier Grand Public. ISBN: 2401049703.
- Dr. Baton-Hervé, E. (2019). Construction des usages numériques : explorer leurs effets sociétaux et sur la santé. (E. m. Marraud, Intervieweur)
- Dr. Ducanda, A.-L. (2019). Construction des usages numériques : explorer leurs effets sociétaux et sur la santé. (E. m. Marraud, Intervieweur)
- Duflo, S. (2018). *Quand les écrans deviennent neurotoxiques: Protégeons le cerveau de nos enfants !* Marabout. ISBN: 2501124030.
- EDNA. (2019). *Total Energy Model for Connected Devices*. Report prepared for IEA 4E EDNA. June 2019.
- Gartner. (2018). *The Edge Completes the Cloud*. A Gartner Trend Insight Report.
- Gazzaley A., L. D. (2016). *The distracted Mind - Ancient Brains in a High-Tech World*. MIT press.
- Génération Numérique. (2017). *Les 11-18 ans et les réseaux sociaux*.
- Génération Numérique. (2019). *Etude 2019 sur les pratiques numériques des 11-18 ans*.
- Génération Numérique, C. (2019). *Les 11-18 ans et la protection de leurs données personnelles*.
- Gujar N. et al. (2011). *Sleep deprivation amplifies reactivity of brain reward networks, biasing the appraisal of positive emotional experiences*. Journal of Neuroscience 23 March 2011, 31 (12) 4466-4474; DOI: <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.3220-10.2011>.
- Hache, E. &. (2019). CRITICAL RAW MATERIALS AND ENERGY TRANSITION: LITHIUM, COPPER, COBALT AND NICKEL A DETAILED BOTTOM-UP ANALYSIS. Dans I. A. Economics (Éd.), *42nd IAAE International Conference*. International Conference on Applied Energy (ICAE 2019). doi:10.13140/RG.2.2.20205.74727
- Hacquard, P. &. (2019). Is the oil industry able to support a world that consumes 105 million barrels of oil per day in 2025? (I. É. Nouvelles, Éd.) *Oil & Gas Science and Technology*, 74, 1-11. doi:10.2516/ogst/2019061
- Hallegate, S. (2009). *Strategies to adapt to an uncertain climate change*. Global Environmental Change 19.
- Hansen, M. e. (2019). *Low physical activity and higher use of screen devices are associated with myopia at the age of 16-17 years in the CCC2000 Eye Study*. Acta Ophthalmol. 2019 Sep 9. doi: 10.1111/aos.14242. [Epub ahead of print].
- Harrington, S. e. (2019). *Risk factors associated with myopia in schoolchildren in Ireland*. Br J Ophthalmol. 2019 Dec ; 103(12) : 1803-1809. doi: 10.1136/bjophthalmol-2018-313325.
- Huawei. (2019). *5G Telecom Power Target Network whitepaper*. 5th Global ICT Energy Efficiency Summit. Sep. 2019.
- IEA. (2016). *Energy Efficiency of the Internet of Things - Technology and Energy Assessment Report*. Prepared for IEA 4E EDNA April 2016.
- iFixIt. (s.d.). <https://fr.ifixit.com/Vue+%5C%C3%5C%89clat%5C%C3%5C%A9e/Ikea+TR%5C%C3%5C%85DFRI+Gateway+Teardown/85936>. Visited on 24/12/2019.
- IKEA, bridge. (2019). <https://www.ikea.com/us/en/p/tradfri-gateway-white-00337813/>. Visited on 24/12/2019.
- IKEA, bulb. (2019). <https://www.ikea.com/be/fr/p/tradfri-ampoule-led-e27-806-lumensans-fil-a-variateur-dintensite-blanc-chaud-opalin-90408797/>. Visited on 24/12/2019.

- IKEA, sensor. (2019). <https://www.ikea.com/gb/en/p/tradfri-wireless-motion-sensorwhite-70429913/>. Visited on 24/12/2019.
- Intolo, P. (2019). *Pain and muscle activity of neck, shoulder, upper back, and forearm during touch screen tablet use by children*. Work. 2019;64(1):85-91. doi: 10.3233/WOR-192971.
- ITRS. (2007). *International Technology Roadmap for Semiconductors – Environment, Safety and Health*. <https://www.semiconductors.org/wp-content/uploads/2018/08/2007ESH.pdf>.
- Kross E. et al. (2013). *Facebook use predicts declines in subjective well-being in young adults*. PLoS One, 8.
- Kumar T., M. M. (2017). *Life Cycle Assessment (LCA) to Assess Energy Neutrality in Occupancy Sensors*. Chakrabarti A., Chakrabarti D. (eds) Research into Design for Communities, Volume 2. ICoRD 2017. Smart Innovation, Systems and Technologies, vol 66. Springer, Singapore ; pp. 105-116.
- Laigaard, P. e. (2019). *Retinal arteriolar wall-to-lumen ratios at 16-17 years in the Copenhagen Child Cohort 2000 Study*. Journal of Hypertension. 2019 Dec 12. doi: 10.1097/HJH.0000000000002329. [Epub ahead of print].
- Lee Teschler. (s.d.). <https://www.powerelectronicstips.com/teardown-inside-ikeassmart-led-bulb/>. Visited on 24/12/2019.
- Lin, L. &. (2016). *Association between social media use and depression among U. S. young adults*. Depression and anxiety. 33(4). doi:10.1002/da.22466
- Lynn White, J. (1967, March). The Historical Roots of Our Ecologic Crisis. *Science*, 155(3767), 1203-1207. Récupéré sur <http://www.jstor.org/stable/1720120?origin=JSTOR-pdf>
- Markowetz, A. (2015). *Digitaler Burnout*. Droemer.
- Martirano, L. (2011). *A Smart Lighting Control to Save Energy*. Proceedings of the 6th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems. Vol. 1. IEEE. 2011, pp. 132–138.
- Masur, E. &. (2016, April). Infants' background television exposure during play: Negative relations to the quantity and quality of mothers' speech and infants' vocabulary acquisition. *First Language*, 36(2), 109–123.
- Nikkelen, S. &. (2014). Media Use and ADHD-Related Behaviors in Children and Adolescents: A Meta-Analysis. *Developmental psychology*. 5., 2228-2241. doi:10.1037/a0037318
- OSRAM Opto Semiconductors GmbH. (2009). *Life Cycle Assessment of Illuminants: A Comparison of Light Bulbs, Compact Fluorescent Lamps, and LED Lamps*.
- Pempek, T. et al. (2014). *The Effects of Background Television on the Quantity and Quality of Child-Directed Speech by Parents*. Journal of Children and Media, vol. 8, no. 3, pp. 211–222, Jul. 2014.
- Philips, bridge. (2019). <https://www2.meethue.com/fr-be/p/hue-bridge/8718696511800>. Visited on 24/12/2019.
- Philips, bulb. (2019). <https://www2.meethue.com/fr-be/p/hue-white-ambiance-ampouleindividuelle-e14/8718696695203>. Visited on 24/12/2019.
- Philips, sensor. (2019). <https://www2.meethue.com/fr-be/p/hue-detecteur-de-mouvement/8718696743171>. Visited on 24/12/2019.
- Primark B. A. et al. (2009). *Association between media use in adolescence and depression in young adulthood*. Archives of General Psychiatry, 66.
- Ra C. K. et al. (2018). *Association of digital media use with subsequent symptoms of attention-deficit/hyperactivity disorder among adolescents*. JAMA, 320.
- Raman S. R. et al. (2018). *Trends in attention-deficit hyperactivity disorder medication use*. Lancet Psychiatry, 5.
- Reinsel, D., Gantz, J., Rydning, J. (2018). *Data Age 2025 – The Digitalization of the World, From Edge to Core*. An IDC Whit Paper, sponsored by Seagate, Nov. 2018.
- Rideout V. (2015). *The common sens census: media use by tweens and teens*. Common sens media.

- Rodgers, R.F. (2017). *Media Exposure in Very Young Girls: Prospective and Cross-Sectional Relationships With BMIz, Self-Esteem and Body Size Stereotypes*. Developmental Psychology. 53. doi: 10.1037/dev0000407.
- Rycroft, M. (2008). *V. Smil, Energy in Nature and Society: General Energetics of Complex Systems*. Surveys in Geophysics. 29. 67-69. 10.1007/s10712-008-9034-2.
- Saxena, R. e. (2017). *Incidence and progression of myopia and associated factors in urban school children in Delhi: The North India Myopia Study (NIM Study)*. PLoS One. 2017 Dec 18 ; 12(12) : e0189774. doi: 10.1371/journal.pone.0189774. eCollection 2017.
- Shakya H. B. et al. (2017). *Association of Facebook use with compromised well-being*. Am J Epidemiol, 185.
- Shehabi, A. (2016). *United States Data Center Energy Usage Report*. p. 47. <https://eta.lbl.gov/publications/united-states-data-center-energy>.
- Takeuchi H. et al. (2015). *The impact of television viewing on brain structures*, Cerebral Cortex, 25.
- Takeuchi, H. et al. (2016). *Impact of videogame play on the brain's microstructures properties*. Molecular Psychiatry, 21.
- Tamana S. K. et al. (2019). *Screen-time is associated with inattention problems in preschoolers*. PLoS One, 14.
- Tanimura, M. (2007). *Television Viewing, Reduced Parental Utterance, and Delayed Speech Development in Infants and Young Children*. Archives of Pediatrics & Adolescent Medicine, vol. 161, no. 6, p. 618, Jun. 2007.
- The Shift Project. (2016). *Les INDC et le budget carbone – Simulation de trajectoires d'émission compatibles avec le budget carbone +2°C*. Paris: https://theshiftproject.org/wpcontent/uploads/2017/12/note_danalyse_les_indc_et_le_budget_carbone_the_shift_project_0.pdf.
- The Shift Project. (2018). *[Lean ICT Materials] Forecast Model*. Paris: Groupe de travail "Lean ICT". Récupéré sur <https://theshiftproject.org/wp-content/uploads/2019/10/Lean-ICT-Materials-Forecast-Model-2018.xlsx>
- The Shift Project. (2018). *Lean ICT – Pour une sobriété numérique*. Paris: Groupe de travail "Lean ICT". Récupéré sur <https://theshiftproject.org/article/pour-unesobriete-numerique-rapport-shift/>
- The Shift Project. (2019). *Climat : l'insoutenable usage de la vidéo en ligne*. Paris. Récupéré sur <https://theshiftproject.org/article/climat-insoutenable-usage-video/>
- The Shift Project. (2019). *Scénarios énergie-climat : Évaluation et Mode d'emploi*. The Shift Project et Afep, Paris. Récupéré sur <https://theshiftproject.org/article/scenarios-energie-climat-evaluation-mode-emploi-rapport-shift/>
- Tisseron, S. (2011). *Intimité et extimité*. Paris: Seuil, "Communications". 2011/1 n° 88, p. 83-91. ISBN: 9782021045789. Récupéré sur <https://www.cairn.info/vue-communications-2011-1-page-83.html>
- Toh S.H. et al. (2019). *Mobile touch screen device use and associations with musculoskeletal symptoms and visual health in a nationally representative sample of Singaporean adolescents*. Ergonomics. 2019 Jun;62(6):778-793. doi: 10.1080/00140139.2018.1562107. Epub 2019 Apr 23.
- Twenge J. et al. (2017). *Increases in depressive symptoms, suicide-related outcomes, and suicide rates among U.S. adolescents after 2010 and links to increased new media screen time*. Clinical psychological science, 6(1) : 3-17. doi: 10.1177/2167702617723376.
- Twenge J. et al. (2018). *Decreases in psychological well-being among American adolescents after 2012 and links to screen time during the rise of smartphone technology*. Emotion. 2018 Sep ; 18(6) : 765-780. doi: 10.1037/emo0000403.
- Van den heuvel M. et al. (2019). *Mobile media device use is associated with expressive language delay in 18-month-old children*. Journal of developmental behavioural pediatrics, 40.
- Verduyn P. et al. (2015). *Passive Facebook usage undermines affective well-being : Experimental and longitudinal evidence*. Journal of Experimental Psychology : General, 144.

- Walsh J. J. et al. (2018). *Associations between 24 hour movement behaviours and global cognition in US children*. Lancet Child & Adolescent Health, 2.
- Weiss M. D. et al. (2011). *The Screen Culture*. Attention Deficit Hyperactivity Disorder, 3.
- Williams, E., D., Ayres, R., U., Heller, M. (2002). *The 1.7 kilogram micropuce: Energy and material use in the production of semiconductor devices*. Environmental science & technology 36.24, pp. 5504–5510.
- Winn, M. (1977). *The Plug-In Drug: Television, Children, And The Family*. Viking Penguin ed., ISBN : 0140076980.
- World Health Organization. (2018). *International Classification of Diseases – ICD-11*. <https://www.who.int/classifications/icd/en/>.
- Xu G. et al. (2018). *Twenty-years trends in diagnosed attention-deficit/hyperactivity disorder among us children and adolescents, 1997-2016*. JAMA Network Open, 1.
- Yoo S. S. et al. (2007). *The human emotional brain whitout sleep – a prefrontal amygdala disconnect*. Current Biology, 17, 2007, pp. R877-R878, doi : <https://doi.org/10.1016/j.cub.2007.08.007>.
- Youmatter. (2019). <https://youmatter.world/fr/definition/scope-1-2-3-definition/>. Visited on 24/12/2019.
- Yung, W., KC et al. (2018). *Carbon Footprint Analysis of Printed Circuit Board*. Environmental Carbon Footprints. Elsevier, pp. 365–431.
- Zengin-Akkuş, P. et al. (2018). *Speech delay in toddlers: Are they only 'late talkers'?* Turk. J. Pediatr., vol. 60, no. 2, pp. 165–172.

Auteurs principaux

Hugues FERREBOEUF

Directeur du groupe de travail Lean ICT – The Shift Project

Pilote de l'Axe 4 « Scénarios prospectifs »

+ 33 (0) 6 18 44 88 21 | hugues.ferreboeuf@theshiftproject.org

Hugues Ferreboeuf est Polytechnicien, Ingénieur du Corps des Mines et Diplômé de Télécom ParisTech. Il a exercé plusieurs postes de Direction Générale de filiales et de Business Units au sein du Groupe France Télécom Orange. Il mène ensuite une double carrière d'entrepreneur et de consultant. Il prenant la présidence d'un opérateur privé franco-allemand de télécommunications mobiles professionnelles (e*Message), et devient Directeur Grands Comptes d'un fournisseur américain d'équipements de télécommunications (Juniper Networks). Il rejoint ensuite le groupe BT, en tant que Directeur Général chargé du secteur Banque et Finance où il est impliqué dans de nombreux projets de Transition Numérique. Il reprend ses activités de conseil en 2016 puis co-fonde Virtus Management afin de mettre au service de grands groupes et de PME son expérience du pilotage de changements. Il se spécialise dans le management des transitions (énergétique, numérique, générationnelle) et met son expérience au service du pilotage du projet « Lean ICT » du think tank *The Shift Project*. Il est l'auteur principal du rapport « Lean ICT – Pour une sobriété numérique » (The Shift Project 2018).

Maxime EFOUI-HESS

Chargé de projet – The Shift Project

Pilote de l'Axe 1 « Analyse de projets smart » et co-pilote de l'Axe 3 « Construction des usages numériques »

+ 33 (0) 6 35 13 08 37 | maxime.efoui@theshiftproject.org

Maxime Efoui-Hess a rejoint l'équipe du Shift pour travailler sur les technologies de l'information et de la communication. Ingénieur spécialiste du climat et de la modélisation, il est diplômé du parcours Energie, Transport, Environnement de l'ISAE-SUPAÉRO et du parcours Dynamique du Climat de l'Université Paul Sabatier à Toulouse et de l'École nationale de la météorologie. Il a aussi travaillé sur les mécanismes physiques du développement caniculaire en climat futur en France et en Europe, au sein du Centre européen de recherche et de formation avancée en calcul scientifique (CERFACS), à Toulouse. Il est co-auteur avec Hugues Ferreboeuf du rapport « Lean ICT – Pour une sobriété numérique » (The Shift Project 2018), et auteur principal du rapport « Climat : l'insoutenable impact de la vidéo en ligne » (The Shift Project 2019).

Laurie MARRAULD

Cheffe de projet Santé – The Shift Project et Maître de conférence – EHESP

Co-pilote de l'Axe 3 « Construction des usages numériques »

+33 (0) 6 10 97 69 72 | laurie.marraud@theshiftproject.org

Laurie Marraud est Maître de Conférences à l'Ecole des Hautes Etudes en Santé Publique (EHESP) spécialisée sur la question des usages des technologies numériques en santé. Docteure en sciences de gestion, elle a réalisé sa thèse à Télécom ParisTech, avant d'intégrer le LGI de l'Ecole Centrale de Paris et le CRG à l'Ecole Polytechnique en tant que post-doctorante. Elle axe ses recherches actuelles sur les conséquences de l'introduction des TIC en santé dans un contexte de transition épidémiologique, démographique et socio-technique. Elle s'intéresse en particulier aux effets ambivalents des technologies en pratique. Elle collabore sur les questions de démocratie sanitaire et des TIC comme levier de l'engagement patient et de nouvelles organisations de soins. Elle a initié en 2019 au *Shift* un travail sur le système de santé, le climat et l'énergie, et contribue au groupe de travail sur l'impact environnemental du numérique, particulièrement sur l'Axe 3 « Construction des usages numériques » du rapport.

Céline LESCOP

Lead Data Architect – AXA

Pilote de l'Axe 2 « Réduire l'impact environnemental du Système d'Information »

+ 33 (0) 6 09 24 54 68 | lescop.celine@gmail.com

Céline Lescop est Lead Data Architect du groupe AXA. Ingénieure en informatique diplômée de l'École Nationale Supérieure d'Informatique pour l'Industrie et l'Entreprise (ENSIIE), elle a d'abord travaillé au sein de directions informatique de l'industrie pharmaceutique (Galderma, AstraZeneca), où elle a pris en charge de bout en bout une grande diversité de projets informatiques. Elle a ensuite exercé en tant qu'architecte data dans conseil (ARISMORE), avant de rejoindre le secteur de l'assurance avec le groupe AXA, dont elle dirige l'architecture data. Depuis 2010, elle enseigne l'architecture data dans des écoles d'ingénieurs (ENSIIE, CentraleSupélec) et anime le groupe de travail « Information Architecture » dans le cadre de l'Architecture Forum de The Open Group depuis 2019 dans le but d'enrichir les standards disponibles sur l'architecture des données. Elle contribue au groupe de travail sur l'impact environnemental du numérique du Shift, pour lequel elle a coordonné les recherches sur l'Axe 2 « Réduire l'impact environnemental du Système d'Information » du rapport.

The Shift Project

The Shift Project est un think tank qui œuvre en faveur d'une économie post-carbone. Association loi 1901 reconnue d'intérêt général et guidée par l'exigence de la rigueur scientifique, notre mission est d'éclairer et influencer le débat sur la transition énergétique en Europe. Nos membres sont de grandes entreprises qui veulent faire de la transition énergétique leur priorité.

Contact presse : Jean-Noël Geist, Chargé des affaires publiques et de la communication
+ 33 (0) 6 95 10 81 91 | jean-noel.geist@theshiftproject.org

THE SHIFT PROJECT

THE CARBON TRANSITION THINK TANK

www.theshiftproject.org