-LEAN ICT-
POUR UNE SOBRIÉTÉ NUMÉRIQUE

RAPPORT INTERMÉDIAIRE DU GROUPE DE TRAVAIL DIRIGÉ PAR HUGUES FERREBOEUF POUR LE THINK TANK THE SHIFT PROJECT – MARS 2018

Étude réalisée avec le soutien de l'Agence française de développement et de la Caisse des dépôts

THE SHIFT PROJECT
THE CARBON TRANSITION THINK TANK

Crédit photo de couverture : Carlos Irineu Da Costa

AVANT-PROPOS

The Shift Project, think tank de la transition énergétique, a pour vocation de se saisir d'enjeux tout à la fois décisifs et délicats pour réussir cette 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 plus importants 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.

Le but : favoriser une maximisation de l'impact positif du numérique sur l'environnement, et une minimisation de ses impacts négatifs. Au vu des nombreuses thèses contradictoires produites sur le sujet jusqu'ici, il nous a paru utile de chercher à aboutir à un examen aussi objectif que possible de l'ensemble de ces impacts, pour en tirer des recommandations pratiques et systémiques, en phase avec les objectifs de décarbonation.

Ce rapport intermédiaire marque une étape importante dans le processus d'analyse approfondie et de consultation de nombreuses personnes et institutions impliquées dans ces questions : il constitue une plateforme qui nous permettra d'enrichir notre réflexion par les commentaires qu'il suscitera.

Les conclusions et recommandations futures du groupe de travail sont destinées à tous les acteurs de la vie économique, sociale et politique, et devront aider à éclairer une question clé pour évoluer vers une société technique durable.

Hugues Ferreboeuf, directeur du groupe de travail « Lean ICT »,
tient à remercier chaleureusement les membres du groupe de travail :

Françoise Berthoud, CNRS et GDS EcoInfo

Philippe Bihouix, Ingénieur

Pierre Fabre, AFD

Daniel Kaplan, FING

Laurent Lefèvre, INRIA

Alexandre Monnin, Université de Clermont Ferrand

Olivier Ridoux, IRISA et Université de Rennes 1

Xavier Verne, SNCF

Maxime Efoui-Hess, The Shift Project

Zeynep Kahraman, The Shift Project

Étude réalisée avec le soutien
de l'Agence française de développement
et de la Caisse des dépôts

TABLE DES MATIERES

Avant-propos 3
Table des matières 4
Index des figures et des tableaux 5
Liste d'abréviations 5
I. Introduction : le numérique, outil ou handicap pour la transition énergétique ? 6
Un outil pour limiter la consommation d'énergie… 6
…ou bien une irrésistible évolution sociétale… 6
…créant des cascades incontrolables d'effets rebonds ? 7
I. Objectifs et démarche de travail du projet « Lean ICT » 8
a. Les trois objectifs du projet 8
b. La démarche du groupe de travail 9
II. Enjeux et constats 10
a. Observations méthodologiques 10
b. Analyse globale 10
III. Le référentiel environnemental du numérique 21
a. Périmètre du référentiel 22
b. Les principales hypothèses de calcul 22
c. REN, phase de production, premiers résultats 23
d. REN, phase d'utilisation, premiers résultats 25
e. Constats et tendances 27
IV. Pistes de réflexion pour recommandations futures 29
V. Travaux en cours 30
VI. Conclusions provisoires 31
VII. Annexes 33
a. Annexe 1 : consommation énergétique du numÉrique 2015-2020 33
b. Annexe 2 : évolution du parc de terminaux communicants 33
c. Annexe 3 : évolution du trafic des data centers et des réseaux 34
VIII. Références 35

Index des figures et des tableaux

FIGURES

Figure 1 : Évolution 2013-2020 de la consommation énergétique du Numérique en TWh 12
Figure 2 : Évolution 2010-2020 de la consommation énergétique du Numérique rapportée à la consommation électrique mondiale 12
Figure 3 : Trajectoires d'émission compatibles avec une hausse de température limitée à 2°C 13
Figure 4 : Distribution de la consommation énergétique du Numérique par poste en 2017 14
Figure 5 : Parc installé et production annuelle de smartphones 15
Figure 6 : Évolution des livraisons d'équipements domestiques connectés 15
Figure 7 : Évolution des parts de trafics 2016-2021 17
Figure 8: Les principaux métaux des TICs 18
Figure 9: Architecture d'un smartphone, petit extrait des métaux 18
Figure 10: Taux de recyclage des métaux 19
Figure 11 : Extraction de l'indium dans le temps 20
Figure 12 : Pays produisant le plus de matières premières critiques 21
Figure 13 : Empreinte carbone des produits Apple à mesure que les spécifications augmentent 25
Figure 14 : Nombre de terminaux installés entre 2013 et 2020 27
Figure 15 : Croissance annuelle des parcs installés de terminaux entre 2016 et 2021 28
Figure 16 : Intensité énergétique mondiale 31
Figure 17 : Évolution comparée des taux de croissance des dépenses ICT et du PIB 31

TABLEAUX

Tableau 1 : Consommation d'énergie mondiale du Numérique en TWh 11
Tableau 2 : Nombre d'équipements par habitant 16
Tableau 3 : Equipements numériques dans un foyer de 4 personnes dans un pays de l'OCDE 16
Tableau 4: Métaux utilisés pour les technologies énergétiques bas-carbone 19
Tableau 5 : Référentiel environnemental du numérique (REN), Production Phase 24
Tableau 6 : Référentiel environnemental du numérique (REN), Run Phase 26
Tableau 7 : Part de l'usage dans les émissions directes de GES 27

LISTE D'ABREVIATIONS

AIE / IEA	Agence internationale de l'énergie
CAGR	Compounded annual growth rate
CO_2eq	Désigne le potentiel de réchauffement global d'un gaz à effet de serre, calculé par équivalence avec une quantité de CO_2 qui aurait le même potentiel de réchauffement global
GES / GHG	Gaz à effet de serre
ICT	Information and communications technologies
OCDE / OECD	Organisation de coopération et de développement économiques
UN / ONU	Nations Unies

I. INTRODUCTION : LE NUMERIQUE, OUTIL OU HANDICAP POUR LA TRANSITION ENERGETIQUE ?

Afin d'empêcher le chaos climatique, l'accord international sur le climat signé à Paris en décembre 2015 engage toutes les nations de la planète à sortir le plus vite possible des énergies fossiles, responsables de l'essentiel des émissions anthropiques de gaz à effet de serre. Tout accroissement de la consommation globale d'énergie rend plus difficile la réussite de ce défi historique vital.

Dans ce contexte, le développement vorace en énergie des usages du Numérique, ainsi que ses interactions actuelles et potentielles avec les politiques climatiques, soulève de nombreuses questions.

Le Numérique est aujourd'hui considéré quasi unanimement comme le principal levier de développement économique et social :

> *« Croissance, emplois et services sont les avantages les plus importants qu'apportent les investissements dans le numérique. […] les technologies numériques aident les entreprises à devenir plus productives ; les populations à trouver des emplois et élargir leurs possibilités, et les pouvoirs publics à fournir des services de meilleure qualité à tous.»* (Banque mondiale, 2016)

Dans les pays développés où la transformation numérique des entreprises et du secteur public s'accélère, il est vu comme **« la » solution pour revenir à la croissance** :

> *« Le marché unique numérique pourrait apporter 415 milliards d'euros[1] à l'économie européenne et stimuler ainsi la création d'emplois, la croissance, la concurrence, l'investissement et l'innovation. Il pourrait élargir les marchés, offrant ainsi de meilleurs services à des prix plus avantageux, transformer les services publics et créer de nouveaux emplois. Il favoriserait la création de nouvelles entreprises et permettrait aux entreprises existantes de se développer et d'innover au sein d'un marché de plus de 500 millions de personnes.»* (Commission Européenne, 2018)

Dans les pays en développement, où l'investissement dans des infrastructures numériques apparaît aussi indispensable que ceux consacrés aux infrastructures électriques ou de transport, sa capacité de disruption apparaît comme l'opportunité d'**entrer sans retard dans la troisième Révolution Industrielle** même s'il existe un risque de fracture sociale liée au degré d'appropriation de la technologie.

> *« Une étude McKinsey parue en novembre 2013 révélait ainsi l'extraordinaire potentiel du numérique sur le continent : en 2025 l'Afrique verrait internet contribuer 300 milliards à son économie, dont 75 milliards de commerces en ligne, avec également 300 milliards de gains de productivité dans de très nombreux secteurs stratégiques. »* (Les Echos, 2016)

UN OUTIL POUR LIMITER LA CONSOMMATION D'ENERGIE…

Le Numérique apparaît aussi souvent comme un moyen de réduire la consommation d'énergie dans un grand nombre de secteurs (concepts « IT for Green » ou « Green by IT »), en permettant une utilisation plus efficiente des ressources : énergie (smart grids, small grids), transport (mobilité connectée), industrie (usine 4.0), services (e-commerce), bâtiments (smart building), agriculture (smart farming, smart water), etc.

À tel point que l'on considère de plus en plus qu'il ne serait pas possible de maîtriser le changement climatique sans un recours massif au Numérique.

Par ailleurs, l'empreinte matérielle du Numérique est très largement sous-estimée par ses utilisateurs, compte tenu de la miniaturisation des équipements et de « l'invisibilité » des infrastructures utilisées. Ce phénomène est renforcé par la généralisation de l'offre de services dans le « Cloud », qui rend d'autant plus imperceptible la réalité physique des usages et conduit à sous-estimer les impacts environnementaux directs du Numérique.

…OU BIEN UNE IRRESISTIBLE EVOLUTION SOCIETALE…

L'équipement numérique (smartphone en particulier) est de plus en plus perçu comme un prolongement de soi, rendant ainsi d'autant plus problématique, voire douloureuse, la prise de conscience de ces impacts.

De ce point de vue, la Transition Numérique est intimement liée à une profonde mutation psycho-sociétale dont les effets sont d'ores et déjà bien observables sur les générations Y et Z chez qui, par exemple, *« il y a aujourd'hui, entre l'objet et son porteur, une intimité de type organique, un rapport de continuité dans lequel l'objet se montre*

[1] Par an, soit presque 3 points de PIB

plus directement efficace à assurer une jouissance directe que n'importe quel partenaire humain » (Gaillard, 2018).

…CREANT DES CASCADES INCONTROLABLES D'EFFETS REBONDS ?

Les impacts bénéfiques indirects sur la consommation énergétique sont, quant à eux, souvent surestimés, du fait notamment de la non-prise en compte d'impacts négatifs indirects. Quant aux gains positifs liés aux progrès sur l'efficacité (en temps, ressources énergétiques, etc.), ils sont en très grande majorité surestimés à cause de la non prise en compte des « **effets rebond**[2] », qui conduisent à augmenter la consommation des ressources dont on a augmenté l'efficacité ou la facilité d'usage…

Nous publierons une analyse spécifique dans notre rapport final, mais il semble clair qu'il n'existe pas d'exemple de technologie qui ait été introduite dans les cinquante dernières années et qui ait permis, par elle-même, une réduction nette de l'emploi de matériaux ou d'énergie dans les processus dans lesquelles elle s'intégrait, comme l'ont montré Magee & Devezas, 2017:

> *« Le cadre d'analyse appliqué à 57 cas différents indique clairement que le progrès technologique ne s'est pas traduit par une dématérialisation « automatique » dans ces différents cas »*
>
> *« L'effet rebond peut (et c'est en général le cas apparemment) surcompenser la dématérialisation directement induite par le progrès technologique. »*

Le risque lié aux effets rebond est ici d'autant plus important que **les processus de transition énergétique et numérique ne soient que très rarement coordonnés au sein d'une même approche systémique**.

Le risque de voir se réaliser un scénario dans lequel des investissements de plus en plus massifs dans le Numérique aboutiraient à une augmentation nette de l'empreinte environnementale des secteurs numérisés est donc bien réel.

[2] Identifié dès la révolution industrielle, l'« effet rebond » décrit comment l'amélioration du rendement énergétique d'un objet particulier (locomotive, ordinateur, etc.) débouche la plupart du temps non sur une diminution, mais au contraire sur un accroissement de la consommation d'énergie globale dédiée à la fonction technique que remplit cet objet (transport ferroviaire, informatique, etc.) De très nombreuses recherches ont confirmé cet état de fait. Récemment, voir en particulier Santarius, Walnum, & Aall, 2016 et Gossart, 2015.

I. OBJECTIFS ET DEMARCHE DE TRAVAIL DU PROJET « LEAN ICT »

Ce rapport intermédiaire permet de partager l'état de nos réflexions à ce stade, de façon détaillée pour ce qui concerne le premier objectif, indicative pour les deux autres.

A. LES TROIS OBJECTIFS DU PROJET

La définition de ce que peut recouvrir l'approche Lean ICT (*« lean »* signifie mince, allégé, optimisé en anglais) ne sera pleinement définie qu'à l'issue de ce projet. Une telle définition, en termes de recommandations pratiques, constitue la finalité même du projet. On peut cependant indiquer déjà que cette approche Lean ICT renvoie tout à la fois à un souci de sobriété dans la consommation de ressources et à la satisfaction au plus juste des besoins ciblés.

Il est impossible d'évaluer des décisions sans mesurer leurs effets, ni de définir des objectifs ou des trajectoires sans être capable de décrire un état initial.

Afin d'éclairer les choix structurants que les décideurs politiques et économiques devront faire dans les trois à cinq ans à venir, pour **coordonner dans une même approche systémique les processus de transition énergétique et numérique**, *The Shift Project* s'est donné trois objectifs.

Objectif 1 : clarifier quantitativement les impacts

Clarifier les impacts environnementaux directs du Numérique via une approche quantitative, tant d'un point de vue global qu'en termes d'usages ou d'équipements caractéristiques, **à travers la publication d'un Référentiel Environnemental du Numérique (REN),** afin de disposer de repères fiables, immédiatement mobilisables par des non-spécialistes, dans la prise de décisions collectives comme individuelles. Il est en effet aujourd'hui difficile de trouver ces données, sauf à se plonger dans un vaste ensemble épars de travaux universitaires et de notices techniques. Le besoin de disposer d'un tel ensemble de données de référence librement accessible a été notamment réaffirmé dans un Livre Blanc publié en mars 2018 par l'IDDRI, la Fing, WWF et GreenIT.fr (Iddri, FING, WWF France, GreenIT.fr, 2018).

Objectif 2 : mettre en évidence des tendances et des leviers

Mettre en évidence de façon quantitative l'incidence, sur l'impact environnemental, des politiques d'investissement, des pratiques de gestion et des usages, au sein des entreprises d'une part, des pays en développement d'autre part, et, simultanément, **identifier les leviers d'amélioration** ainsi que leurs conséquences économiques, sociales et environnementales. Nous nous sommes volontairement concentrés sur ces deux seuls exemples d'écosystème numérique, afin de pouvoir disposer d'analyses non seulement qualitatives mais également quantitatives de l'efficacité de ces leviers.

Objectif 3 : proposer des actions

Mener des actions de promotion des bonnes pratiques constituant ainsi un usage raisonné du Numérique, y compris au service d'initiatives plus globales de développement durable, auprès des décideurs politiques et économiques, en France et en Europe, ceci en coordination avec d'autres acteurs publics ou privés partageant les mêmes objectifs.

B. LA DEMARCHE DU GROUPE DE TRAVAIL

Un groupe de travail de 10 personnes – universitaires, professionnelles et expertes du secteur – se réunit régulièrement depuis avril 2017, donnant lieu à des travaux de modélisation et de consolidation des études, ainsi qu'à des échanges d'expertise. Ces réunions sont complétées par des interviews d'acteurs et d'experts des problématiques concernées.

Certains points sont approfondis par les « Shifters », le réseau de bénévoles partenaires du *Shift Project*. Nous recourons également, autant que de besoin, à l'avis d'autres groupes de travail du *Shift Project*.

Une bibliographie importante a été rassemblée : près de 170 travaux, la plupart publiés entre 2014 et 2017 (nous nous sommes concentrés sur cette période, compte tenu du rythme d'évolution du secteur, des usages et des technologies numériques), une majorité étant des articles scientifiques ou des études faites par des organismes publics.

Nous avons privilégié les articles citant des sources primaires d'information et décrivant en détail leur méthodologie de calcul.

En effet, nous nous sommes aperçus assez rapidement qu'une bonne partie de la littérature sur le sujet reprenait des chiffres issus de documents antérieurs, très souvent sans les croiser avec d'autres, et sans les assortir de précautions sur leurs limites de validité.

Ces limites pouvant venir :

- d'une ancienneté trop importante ;
- du fait que les chiffres sont le résultat d'un modèle, reposant forcément sur des hypothèses simplificatrices et pouvant elles-mêmes devenir obsolètes ;
- de la taille et des spécificités de l'échantillon lorsqu'il s'agit de chiffres issus de mesures.

À noter d'ailleurs qu'il existe peu de chiffres globaux (à l'échelle d'un pays par exemple) issus de mesures et que les divergences observées d'une étude à l'autre viennent de l'étape de modélisation ou du périmètre considéré.

La présence insuffisante de tels chiffres, donnant prise à des perceptions erronées, est d'ailleurs une composante intégrale de la problématique objet de notre étude.

La publication de ce rapport intermédiaire intervenant en début 2018, elle nous permettra d'interagir dans les semaines qui viennent avec d'autres acteurs explorant les interactions entre le Numérique et l'Environnement, en France et en Europe, avant la publication de notre rapport final, prévue en Juin 2018.

II. ENJEUX ET CONSTATS

A. OBSERVATIONS METHODOLOGIQUES

Compte-tenu de la rapidité des évolutions technologiques, les frontières du Numérique sont mouvantes et nous avons retenu une définition assez large, cohérente avec celle aujourd'hui utilisée par des acteurs de référence du secteur numérique dans leurs approches prospectives (Cisco, Gartner etc.).

Le périmètre des équipements (et des usages associés) que nous avons retenu pour le calcul de l'empreinte énergétique et environnementale est donc le suivant :

- Réseaux de télécommunication (d'accès et de transport, fixe, wifi et mobile)
- Data centers
- Terminaux : ordinateurs personnels (fixes et portables), tablettes, smartphones, téléphones portables traditionnels, « boxes », équipements audiovisuels connectés (y compris les téléviseurs connectés)
- Capteurs IoT (Internet of Things)[3]

Ce périmètre exclut les équipements numériques non communicants intégrés dans les automobiles ni les composants numériques des chaines de production industrielles.

Pour tous ces équipements, nous prenons en compte la phase de production et la phase d'utilisation.

Nous n'avons pas quantifié les impacts liés à la phase de fin de vie, par manque de données fiables notamment à cause de la faible proportion d'équipements pris en charge dans les filières de traitement (15% dans le Monde, Baldé et *al.* 2015). Cette situation est préoccupante puisqu'elle résulte non-seulement en une perte de métaux mais aussi en une pollution des sols croissante et largement ignorée, même si cette dernière elle est localisée aux sites de production et aux sites de traitement inadapté, voire aux décharges sauvages de déchets.

Le périmètre de nos analyses est d'abord mondial, sachant par ailleurs que nous les détaillons sur un plan européen et/ou français, lorsque la granularité des sources primaires d'information le permet.

B. ANALYSE GLOBALE

1. Consommation énergétique : une croissance problématique

Comme nous l'avons mentionné en introduction, il n'existe pas de chiffres globaux issus de mesures (même à l'échelle d'un pays) de la consommation d'énergie induite par les usages du Numérique. Les estimations disponibles sont obtenues soit par projection de mesures réalisées sur des échantillons (par exemple, un ensemble de data centers), soit par utilisation de modèles plus ou moins sophistiqués, mais détaillant rarement l'ensemble des hypothèses adoptées; en outre, le périmètre retenu dans les études disponibles comme étant celui du Numérique est variable.

Nous avons choisi de nous appuyer sur un modèle développé par Andrae et Edler, 2015 pour quatre raisons principales :

- le périmètre adopté est similaire à notre définition du Numérique et ce périmètre est mondial;
- l'article est un article scientifique ayant fait l'objet d'une « peer review » avant publication;
- l'ensemble des hypothèses utilisées et des formules de calcul est explicité;
- la granularité du modèle est suffisante pour faire des études de sensibilité sans que son niveau de complexité empêche une identification claire des paramètres dimensionnant.

L'étude d'Andrae et Edler, 2015 élabore 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'accélèrent 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;

[3] L'Internet des objets, ou IdO (en anglais Internet of Things, ou IoT) est l'infrastructure mondiale pour la société de l'information, qui permet de disposer de services évolués en interconnectant des objets (physiques ou virtuels) grâce aux technologies de l'information et de la communication interopérables existantes ou en évolution (Union Internationale des télécommunications, 2012).

- **« worst case »** : les gains d'efficacité énergétiques sont moindres et la croissance du trafic s'accélère.

Nous avons souhaité dans un premier temps actualiser le point de passage en 2017 sur la base de données à jour, relatives aux paramètres dimensionnants. Puis, nous avons mis à jour les prévisions en nous limitant à un horizon 2020, donc sans hypothèse de rupture technologique.

Nous avons donc mis à jour les données de trafic et de parcs installés à partir de deux rapports publiés annuellement par Cisco :

- *Cisco Global Cloud Index, Forecast and Methodology, Whitepaper* (Cisco, 2018) décrivant les caractéristiques qualitatives et quantitatives des flux de données traités dans les data centers, de l'année précédant le rapport à un horizon de 5 ans ;
- *Cisco The Zettabyte era, Trends and Analysis, Whitepaper* (Cisco, 2017a) décrivant les caractéristiques qualitatives et quantitatives des flux de données écoulés par les réseaux de télécommunication et des parcs de terminaux connectés, de l'année précédant le rapport à un horizon de 5 ans.

En ce qui concerne la production de terminaux, nous nous nous sommes appuyés sur les chiffres publiés trimestriellement par Gartner[4] et IDC (International Data Corporation)[5], et nous avons actualisé les statistiques de consommation globale (tous secteurs) d'électricité à partir de la base de données *Headline Energy Data 2017* de l'Agence internationale de l'énergie (IEA, 2017).

Enfin, nous avons défini deux scénarios pour établir nos prévisions 2020 :

- **« Expected revised »** : 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;
- **« Revised high growth and 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 2020 le taux de croissance historique

Il en ressort que **la consommation énergétique du Numérique dans le monde augmente d'environ 8,5% par an**, 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 un peu plus de 8 ans.

Consommation d'énergie en Twh	2015	2020	CAGR[6]
Expected - 2015	2312	2878	4,5%
Worst - 2015	3677	5976	10%
Expected revised	2450	3777	9%
Higher growth and EE	2394	3512	8%

Tableau 1 : Consommation d'énergie mondiale du Numérique en TWh
[Source: The Shift Project d'après Andrae et Edler (2015)]

La part du Numérique dans la consommation finale d'énergie (elle-même en croissance de 1,5% par an) augmentera ainsi de 50% de 2013 à 2020.

[4] http://www.gartner.com
[5] http://www.idc.fr
[6] 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.

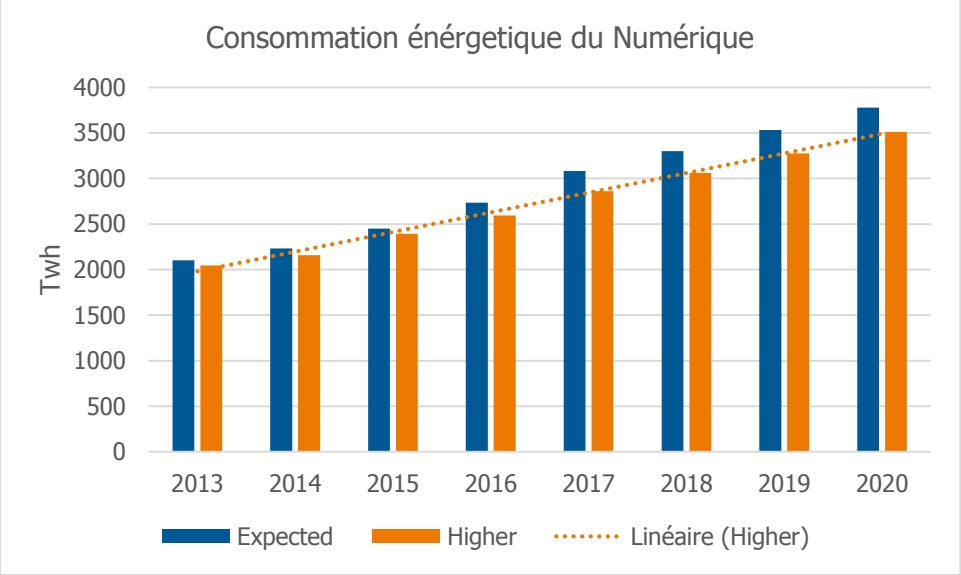


Figure 1 : Évolution 2013-2020 de la consommation énergétique du Numérique en TWh
[Source : calculé par The Shift Project à partir des données publiées par Andrae et Edler (2015)]

En rapportant la consommation énergétique du Numérique à la consommation mondiale d'électricité (elle-même en croissance de 3% par an), **cette proportion passe de 11% en 2013 à 14% en 2017, et atteint presque 16% en 2020**.

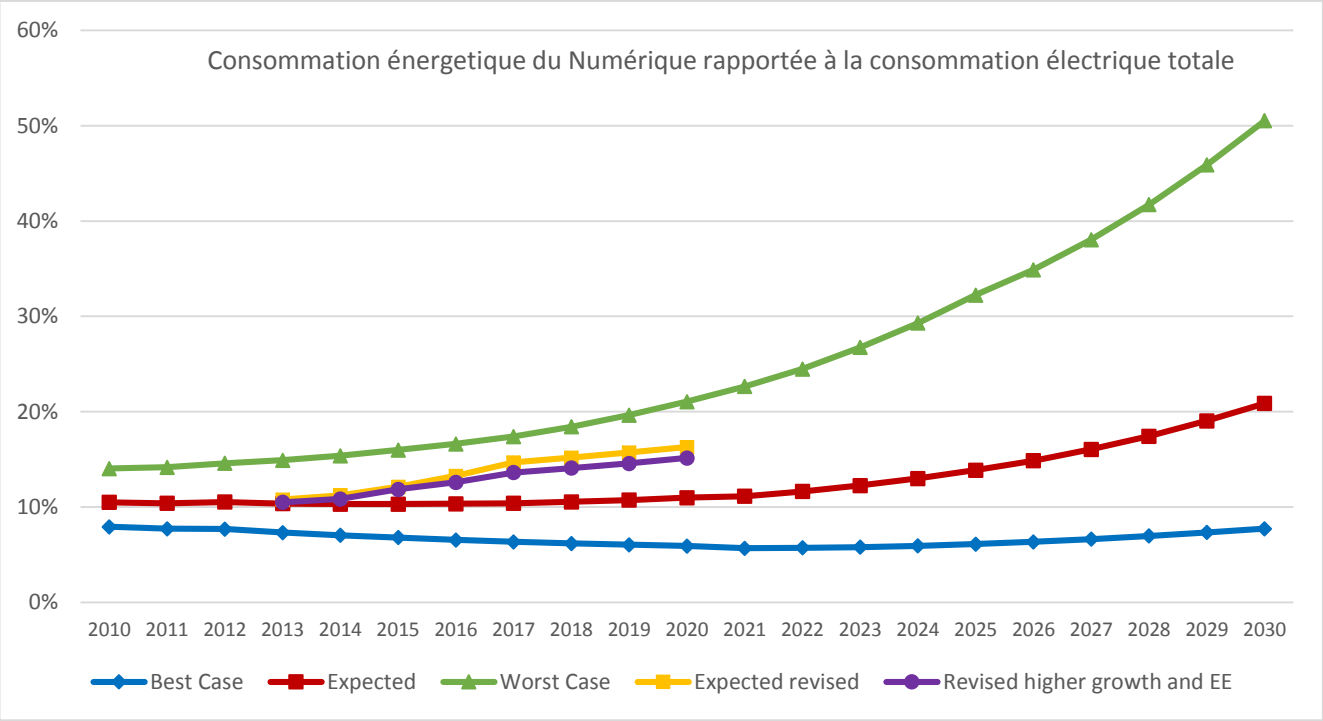


Figure 2 : Évolution 2010-2020 de la consommation énergétique du Numérique rapportée à la consommation électrique mondiale[7]
[Source: calculé par The Shift Project à partir des données publiées par Andrae et Edler (2015)]

Compte tenu du mix électrique mondial, la part d'émissions de **gaz à effet de serre (GES)** attribuable au Numérique passerait ainsi de 2% en 2013 à 3% en 2020 (1,5 Gt) selon notre estimation.

Ce chiffre est du même ordre de grandeur que ceux relatifs à des secteurs réputés beaucoup plus consommateurs d'énergie carbonée et dont l'empreinte matérielle est réputée bien plus grande: la part des émissions attribuable au numérique passerait de 2 à 3% entre 2013 et 2020 alors que celle des véhicules légers (automobiles, motos…) est d'environ 8% en 2018 et celle du transport aérien civil d'environ 2% en 2018. Toujours à titre de comparaison, le Numérique devrait émettre en 2020 autant de GES que l'Inde au début de cette décennie, pour la totalité de ses activités et de son milliard deux cent millions d'habitants.

[7] Mise à jour par The Shift Project pour "Expected Revised" et "Revised high growth" and "Energy Efficiency"

Plus préoccupant encore est le **taux de croissance d'environ 7% des émissions de GES dues au Numérique**. En effet, cette croissance doit s'analyser dorénavant en regard des objectifs de réduction des émissions de GES tels que définis lors de la COP 21.

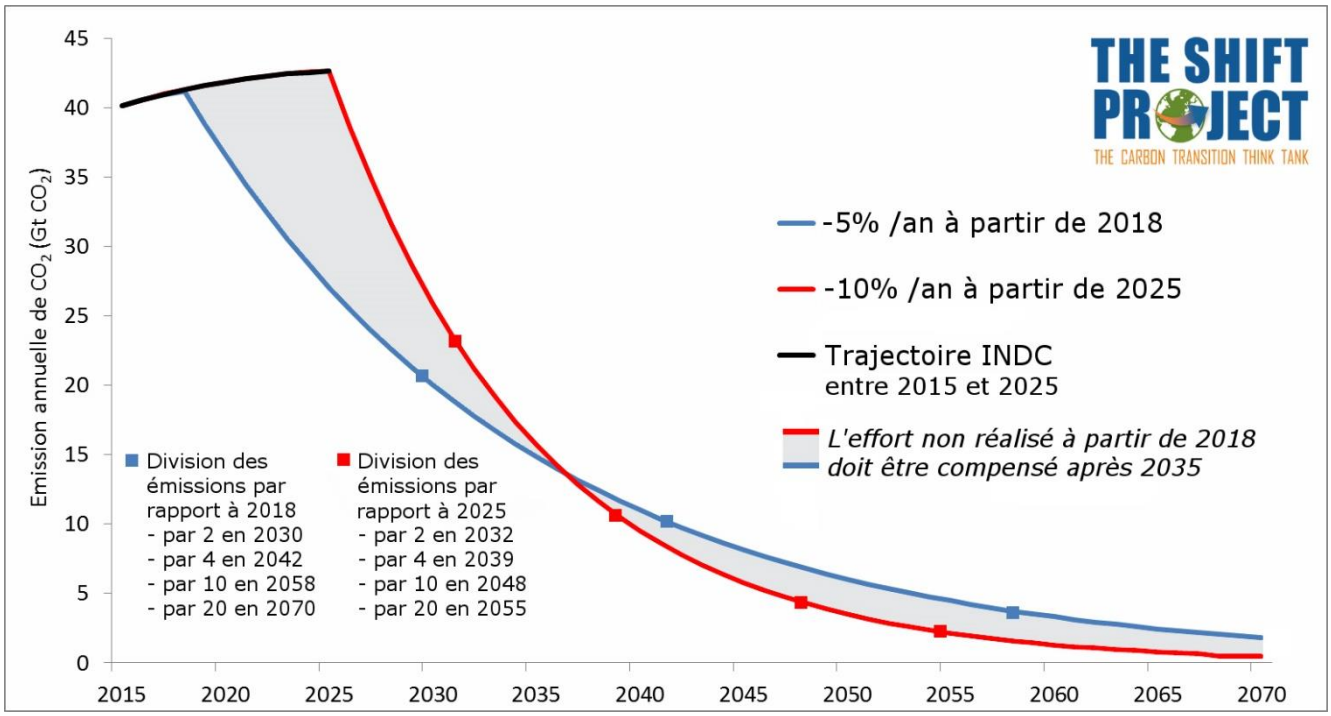


Figure 3 : Trajectoires d'émission compatibles avec une hausse de température limitée à 2°C
[Source : The Shift Project, 2016]

Il faudra en effet (voir Figure 3) au moins réduire de 5% par an à partir de 2018 les émissions de GES pour atteindre ces objectifs, ce qui représente 2,5 $GtCO_2eq$ en début de période, et un effort de réduction cumulée d'environ 11 $GtCO_2eq$ sur les 5 premières années.

Au rythme de croissance actuelle des émissions de GES du Numérique, le cumul sur la même période des émissions supplémentaires du Numérique par rapport à 2018 serait d'environ 1,6 $GtCO_2eq$, ce qui **annihilerait près de 15% de l'effort de réduction global nécessaire**.

La phase de production des équipements occupe une part très significative, environ 50% en 2020, dans l'empreinte énergétique totale du Numérique, ainsi que dans les émissions de GES qui en découlent.

NB. Nos principales conclusions sur ce point sont présentées dans la partie consacrée à la présentation du Référentiel Environnemental du Numérique (REN). Les ordres de grandeur présentés ci-dessous afin de décrire le panorama général, sont issus des données de synthétiques fournies du REN.

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 plus de 90% avant même son achat[8]. 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 et à son processus de production.

[8] 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% : voir Ercan, 2013

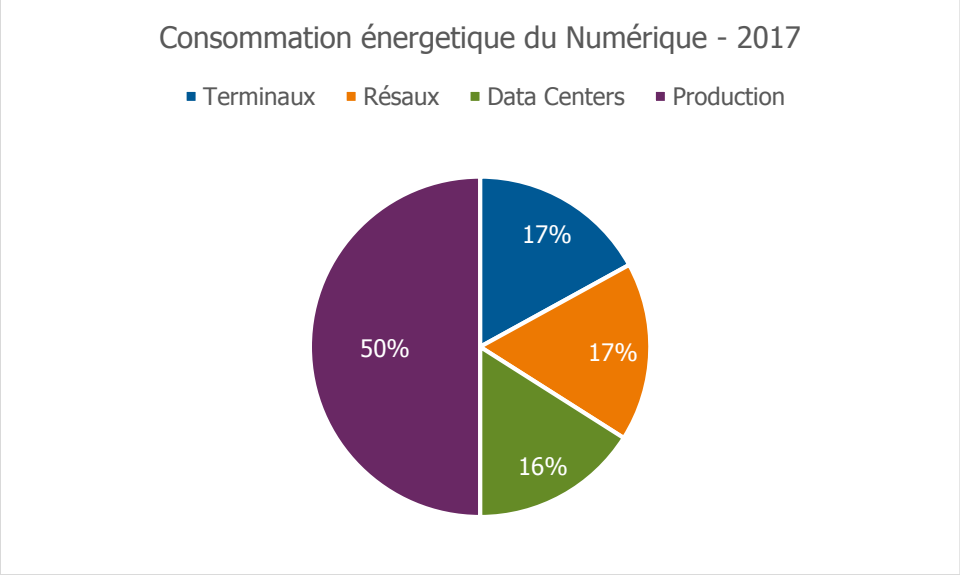


Figure 4 : Distribution de la consommation énergétique du Numérique par poste en 2017

[Source : calculé par The Shift Project à partir des données publiées par *Andrae et Edler (2015)]*

Les sources de la forte croissance de la consommation énergétique du Numérique sont multiples mais on peut, en première analyse, identifier 4 sources principales :

- le phénomène smartphone;
- 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);
- l'explosion du trafic de données.

Le phénomène smartphone

Non seulement le parc est rapidement croissant (4 Milliards en 2017, 5,5 Milliards en 2020, soit **11% par an,** Cisco, 2017b) mais la richesse des fonctionnalités du smartphone ne cesse d'augmenter, ce qui entraîne une consommation d'énergie plus importante lors de sa production, notamment du fait de l'extraction des métaux, toujours plus diversifiés.

La consommation d'énergie du terminal lors de son utilisation[9] augmente également à cause de l'utilisation d'applicatifs plus nombreux : un marqueur de cette dernière tendance est le fait que la fréquence de rechargement de nos smartphones reste à peu près constante alors que la puissance moyenne de la batterie a augmenté de 50% en 5 ans.

Bien que ce dernier phénomène soit un remarquable exemple d'effet rebond, il n'en reste pas moins que l'essentiel de la consommation d'énergie se situe en phase de production : **90 % contre 10% pour son utilisation,** selon les données synthétiques issues du REN[10].

Or, les volumes de ventes (1,6 Milliard d'unités en 2017, Gartner, 2018a) sont tirés non seulement par l'équipement progressif des Pays en Développement mais aussi par des habitudes de consommation « inflationnistes » dans les pays développés (fréquence de renouvellement inférieure à 2 ans), en partie alimentées par des constats d'obsolescence plus ou moins programmée : les versions successives des systèmes d'exploitation ne sont compatibles avec les terminaux de générations antérieures qu'au prix de la dégradation des performances et/ou d'une réduction importante de la capacité utile de la batterie.

[9] La consommation d'énergie augmente également lors du recyclage car l'énergie de séparation des métaux est fonction de la complexité d'assemblage.

[10] On néglige ici l'énergie consommée lors de la fin de vie compte tenu du faible taux de prise en charge dans les filières de recyclage et de l'absence de données correspondantes.

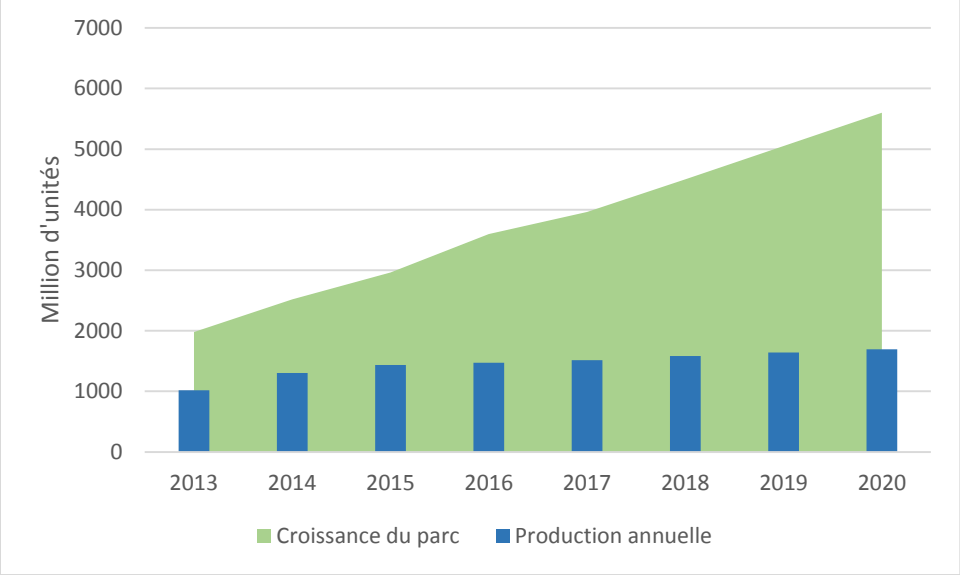


Figure 5 : Production annuelle des smartphones et la croissance mondiale du parc
[Source : calculé par The Shift Project à partir des données publiées par *Cisco (2014), Cisco (2016a), Cisco (2016b), Cisco (2017), IDC (2017a)]*

La multiplication des périphériques de la vie quotidienne (ou « connected living »)

De nouveaux périphériques apparaissent (bracelets mesurant l'activité physique, enceintes bluetooth portables, etc.) et des équipements existant dans tous les foyers deviennent communicants (télévisions, réfrigérateurs, machine à café, systèmes d'alarme et de surveillance, thermostats, éclairage etc). Cette tendance est si forte qu'elle entraîne une croissance de plus de 60% par an de la production de modules de communication embarqués (voir Figure 2 ci-dessous).

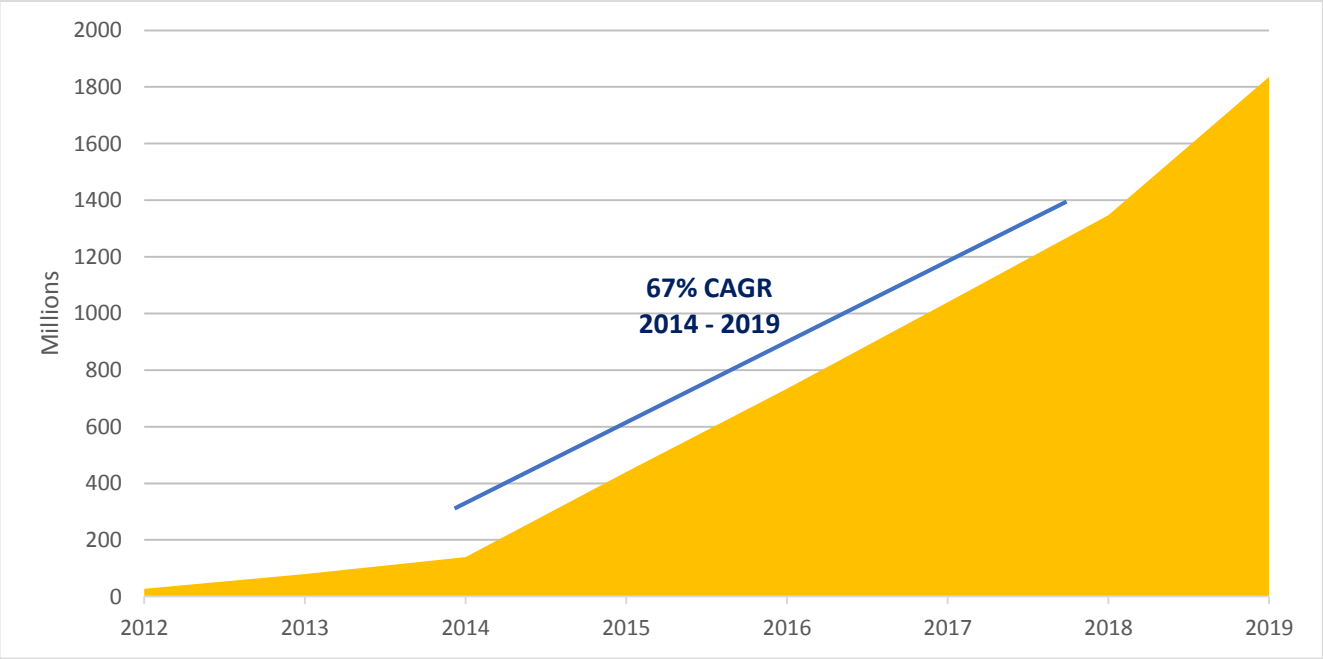


Figure 6 : Évolution des livraisons d'équipements domestiques connectés[11]
[Source : GSMA, 2015]

Selon l'étude de GSMA, 2015 on s'attend ainsi à ce qu'un foyer de 4 personnes dans un pays développé multiplie par 5 en dix ans le nombre de ses équipements numériques connectés : 10 en 2012, 25 en 2017, 50 en 2022 tandis que le taux d'équipement moyen mondial va augmenter de 50% entre 2016 et 2021 :

[11] Définition d'équipements domestiques connectés de Business Insider comprend tous les appareils intelligents (machines à laver, sèche-linges, réfrigérateurs, etc.), les systèmes de sûreté et de sécurité (capteurs, moniteurs, caméras et systèmes d'alarme connectés à Internet) et les équipements énergétiques tels que les thermostats intelligents et les éclairages intelligents.

Nombre d'équipements connectés par personne	2016	2021	Croissance annuelle
Asie-Pacifique	1,9	2,9	8,3%
Europe centrale et orientale	2,5	3,8	9,1%
Amérique latine	2,1	2,9	7,0%
Moyen-Orient et Afrique	1,1	1,4	5,4%
Amérique du Nord	7,7	12,9	11,0%
Europe de l'Ouest	5,3	8,9	10,9%
Global	2,3	3,5	8,5%

Tableau 2 : Nombre d'équipements par habitant

[Source : Cisco 2017b]

2012	2017	2022
2 smartphones	4 smartphones	4 smartphones
2 laptops/computers	2 laptops	2 laptops
1 tablet	2 tablets	2 tablets
1 DSL/Cable/Fibre/Wifi Modem	1 connected television	3 connected television
1 printer/scanner	2 connected set-top boxes	3 connected set-top boxes
1 game console	1 network attached storage	2 eReaders
	2 eReaders	1 printer/scanner
	1 printer/scanner	1 smart metre
	1 game console	3 connected stereo systems
	1 smart metre	1 digital camera
	2 connected stereo systems	1 energy consumption display
	1 energy consumption display	2 connected cars
	1 Internet connected car	7 smart light bulbs
	1 pair of connected sport shoes	3 connected sport devices
	1 pay as you drive device	5 internet connected power sock
	1 network attached storage	1 weight scale
		1 eHealth device
		2 pay as you drive devices
		1 intelligent thermostat
		1 network attached storage
		4 home automation sensors

Tableau 3 : Équipements numériques dans un foyer de 4 personnes dans un pays de l'OCDE

[Source : GSMA, 2015]

Alors que le taux d'équipement augmente dans toutes les régions du Monde, la croissance attendue d'ici 2021 dans les pays développés déjà suréquipés pourrait être cependant **largement supérieure à celle des pays en développement**: 70% en Amérique du Nord contre 25% pour le continent africain, accentuant ainsi l'écart existant, pourtant déjà considérable.

Essor de l'Internet des Objets Industriels (IIoT)

L'Internet des Objets Industriels (IIoT – Industrial Internet of Things) consiste, grâce à une technologie embarquée (capteurs, actionneurs, puces RFID…) à identifier et faire communiquer entre eux, tous les maillons des chaînes de valeur (machines, produits en cours de fabrication, finis et en cours d'utilisation, collaborateurs, fournisseurs, clients, infrastructures,…), que l'on peut désigner comme des « objets ».

Les objets connectés permettent alors de remonter des informations – qui n'étaient jusqu'à présent connues que par des actions manuelles humaines – sous forme de données, données qui peuvent ensuite être stockées puis analysées. C'est un des piliers technologiques de l'Industrie 4.0, avec la robotique et l'intelligence artificielle.

L'IIoT conduit les entreprises à procéder à des investissements considérables en technologies numériques communicantes (de l'ordre de 965 milliards de dollars en 2017) et en forte croissance (environ 21% par an)

(Gartner, 2017). Selon Gartner, le nombre d'interfaces de communication de ce type va augmenter de 55% par an jusqu'à atteindre **7,5 milliards en 2020** (Gartner, 2017). Cet essor devrait contribuer à faire passer le nombre total d'équipements connectés de 8,4 Milliards en 2017 à 20 Milliards en 2020.

L'explosion du trafic de données

La croissance du **nombre d'utilisateurs** équipés d'au moins un terminal connecté (notamment dans les pays en développement), l'augmentation du **ratio** du nombre de terminaux connectés par individu (de 2,1 en 2015 à 3,3 en 2020 en moyenne mondiale), l'augmentation du **trafic vidéo** couplée à la part croissante des images de qualité HD et UHD et au déport des usages vers de la **consommation à la demande** (streaming, VOD, cloud gaming)[12] provoquent une explosion du trafic sur les réseaux (plus de 25% par an, Cisco, 2017a) et dans les data centers (+35% par an, Cisco, 2018). Cette croissance se produit à un rythme qui surpasse celui des gains d'efficacité énergétique des équipements, des réseaux et des data centers. Ces prévisions de trafic sont par ailleurs **régulièrement revues à la hausse.**

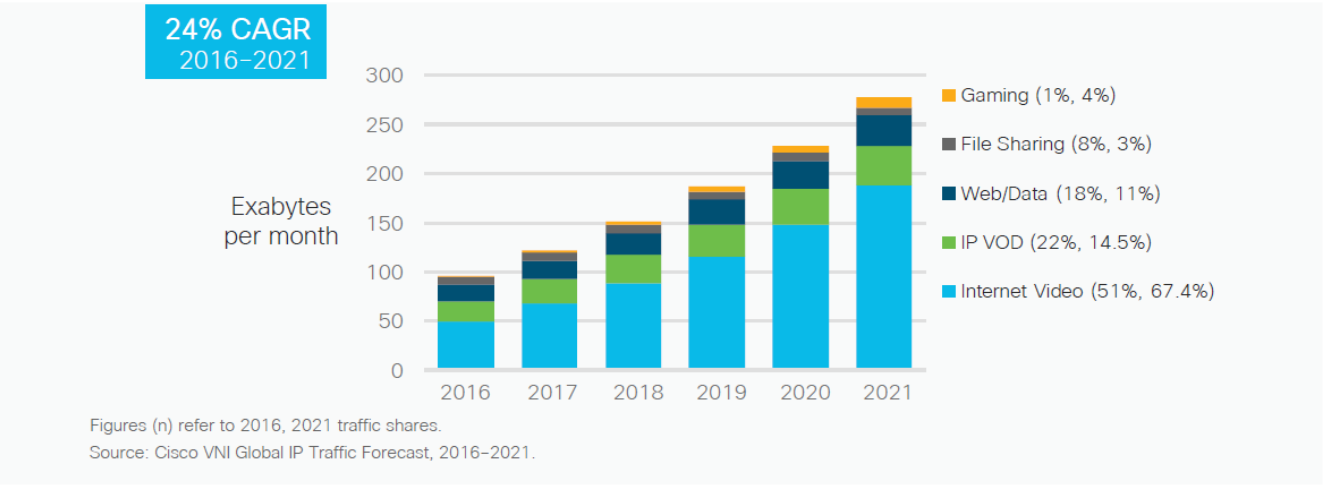


Figure 7 : Évolution des parts de trafics 2016-2021

[Source : Cisco, 2017a]

L'essentiel de la croissance de ces flux de données est attribuable à la consommation des services fournis par les « GAFA »[13], à tel point que celle-ci peut représenter 80% du trafic écoulé sur le réseau de certains opérateurs. Cette augmentation du trafic s'accompagne d'une augmentation du volume de données stockées dans les data centers, tirée par les approches « Cloud » et « Big data », encore plus importante : +40% par an, soit 1 Zettaoctet en 2020 (Cisco, 2018).

Les données stockées dans les data centers devraient représenter ainsi 20% du volume (5 Zettaoctets) de données stockées dans les terminaux, contre 14% en 2015, ce qui contribuera à faire croître le trafic. A noter que Cisco estime à 67 Zettaoctets en 2020 le volume de données « utiles » produites par les approches IoT et IIoT, soit 35 fois plus que la capacité de stockage prévue dans les data centers à cette échéance. Il sera donc nécessaire pour garantir la pleine efficacité des approches « Cloud » et « Big data » actuellement mises en œuvre :

- que de nouvelles architectures (edge computing[14], fog computing), déportant les capacités de traitement et de stockage des données au plus près des capteurs, soient mises en place pour que les services basés sur l'IOT et l'IIoT se développent effectivement. Ceci devrait entraîner une augmentation supplémentaire du parc d'équipements actifs, ainsi que de la dépense énergétique.
- de développer des capacités de stockage supplémentaires basées sur la technologie SSD[15] (notamment 3D NAND). Ceci va entraîner une augmentation de l'intensité énergétique de ces équipements liée à la phase de fabrication.

A noter par ailleurs que cette croissance est si forte qu'une question se pose quant à la capacité même d'assurer une production industrielle suffisante en termes d'équipements de stockage à l'échéance 2020 (Techradar, 2015).

[12] La proportion de téléviseurs UHD va passer de 15% du parc installé en 2016 à 56% en 2021 (Cisco, 2017a)
[13] Google, Apple, Facebook, Amazon auxquels on ajoute de plus en plus Baidu, Alibaba, Tencent (BAT).
[14] « Edge Computing est une architecture informatique distribuée ouverte qui présente une puissance de traitement décentralisée permettant les technologies de l'informatique mobile et de l'Internet des Objets (IoT). Les données y sont traitées par le périphérique lui-même ou par un ordinateur ou un serveur local au lieu d'être transmises à un datacenter. » (HPE, 2018). Fog computing rapproche encore plus le traitement des données de leur point d'émission, en intégrant dans l'infrastructure tout objet connecté.
[15] SSD ou Solid State Disk ou mémoire Flash : le stockage est réalisé dans des puces informatiques.

2. Les métaux rares : une potentielle vulnérabilité

La production d'équipements numériques est fortement consommatrice de métaux**,** certains rares et/ou critiques dont les réserves accessibles (au coût actuel et avec les technologies actuelles) sont limitées et qui présentent des pics de production probables dans les décennies à venir pour beaucoup d'entre eux. Cette situation est susceptible non seulement de fragiliser le développement des usages mais également de porter atteinte à la résilience de nos sociétés numériques.

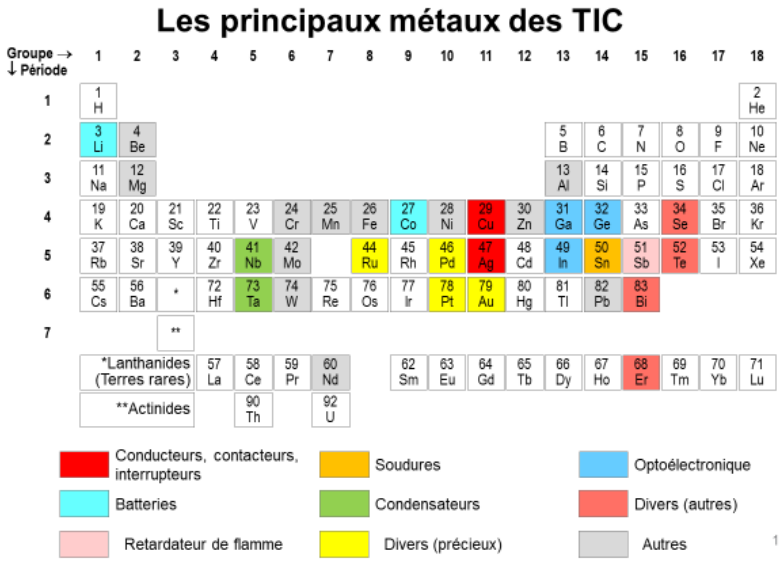


Figure 8: Les principaux métaux des TICs

[Source : Bihouix (2015)]

Alors que la part du Numérique dans la consommation globale de certains de ces métaux est relativement modeste (cuivre, platine, or), il n'en est pas de même pour d'autres dont il est le principal utilisateur (gallium, indium, tantale, ruthénium, germanium). Au moins une quarantaine de métaux sont par exemple présents dans un smartphone, chacun en des quantités allant de quelques milligrammes à quelques dizaines de grammes. La Figure 5 montre, de façon simplifiée, la correspondance de chacun des métaux avec un composant fonctionnel, dont il permet d'optimiser les performances et/ou d'en réduire le coût.

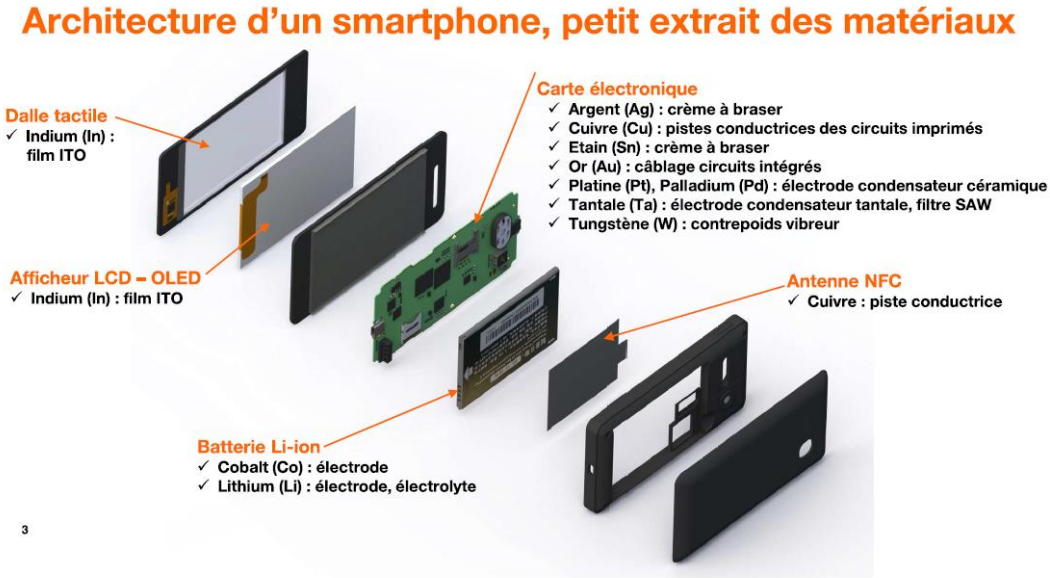


Figure 9: Architecture d'un smartphone, petit extrait des métaux

[Source : Orange Labs, 2017]

Tandis que l'augmentation des taux d'équipements et la multiplication des types de périphériques sollicitent à plein l'exploitation des réserves disponibles de ces métaux, il s'avère que beaucoup d'entre eux sont faiblement recyclables : par exemple, le taux de recyclage de l'indium, du gallium, du tantale et du germanium est inférieur à 1%.

Le recyclage devient en outre plus difficile au fur et à mesure que le nombre de métaux présents dans un composant augmente et que les concentrations diminuent.

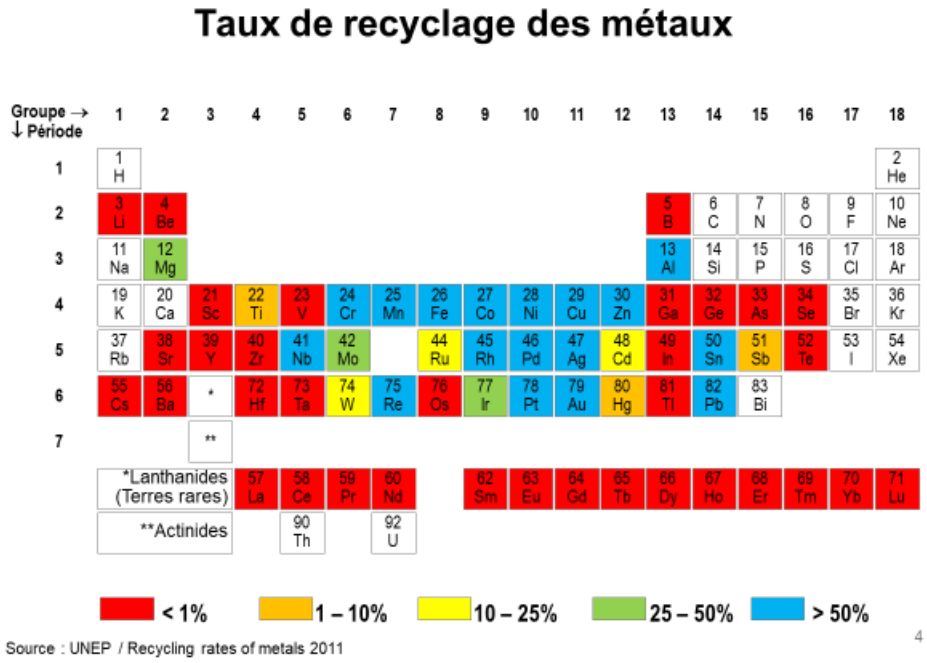


Figure 10: Taux de recyclage des métaux

[Source: Recycling rates of metals, UNEP, 2011]

Cette situation peut donc conduire à une **impasse technologique,** si la croissance des besoins ne ralentit pas, et ceci d'autant plus que nombre de ces métaux sont également utilisés (Banque mondiale, 2017) dans de fortes proportions pour la production des équipements nécessaires aux énergies renouvelables (éolien, solaire), comme le montre le tableau ci-dessous :

	Wind	Solar photovoltaic	Concentrating solar power	Carbon capture and storage	Nuclear power	Light-emitting diodes	Electric vehicles	Energy storage	Electric motors
Aluminum	X	X	X	X		X		X	X
Chromium	X			X	X	X			
Cobalt				X	X		X	X	
Copper	X	X		X	X	X	X		X
Indium		X			X	X	X		
Iron (cast)	X		X			X		X	
Iron (magnet)	X								X
Lead	X	X			X	X			
Lithium							X	X	
Manganese	X			X			X	X	
Molybdenum	X	X		X	X	X			
Neodymium (proxy for rare earths)	X						X		
Nickel	X	X		X	X	X	X	X	
Silver		X	X		X	X	X		
Steel (Engineering)	X								
Zinc		X				X			

Tableau 4: Métaux utilisés pour les technologies énergétiques bas-carbone

[Source: Banque mondiale, 2017]

A titre d'exemple, la situation de l'indium pointe vers l'apparition de difficultés d'approvisionnement dès les années 2030/2035.

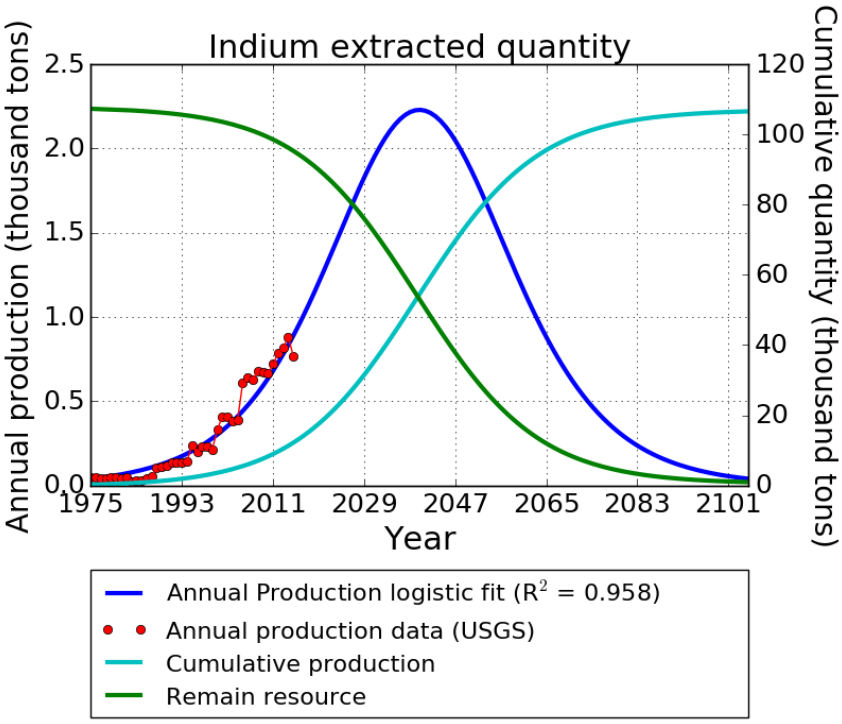


Figure 11 : Extraction de l'indium dans le temps
[Source: Halloy, 2018]

D'autre part, ces métaux sont source de pollution des sols lors de leur extraction (également source d'émission de GES) et en fin de vie des équipements lorsque la filière de traitement n'est pas adaptée (ce qui concerne plus de la moitié en masse des équipements électriques et électroniques en France, et bien davantage dans le monde).

Par ailleurs, et même si cet aspect ne fait pas partie en tant que tel du champ d'analyse de notre étude, la plupart de ces métaux rares sont produits soit dans des pays profondément instables (par exemple, 65% de la production mondiale de Cobalt vient de la République Démocratique du Congo), soit de façon quasiment monopolistique par une superpuissance (90% de la production de terres rares est sous le contrôle de la Chine, qui en consomme d'ailleurs 60%, Lepesant, 2018). Cette situation est porteuse de risques d'approvisionnement, ou à tout le moins de tensions sur les prix, pouvant remettre brutalement en question des choix industriels et, par voie de conséquence, le fonctionnement de nos sociétés techniques.

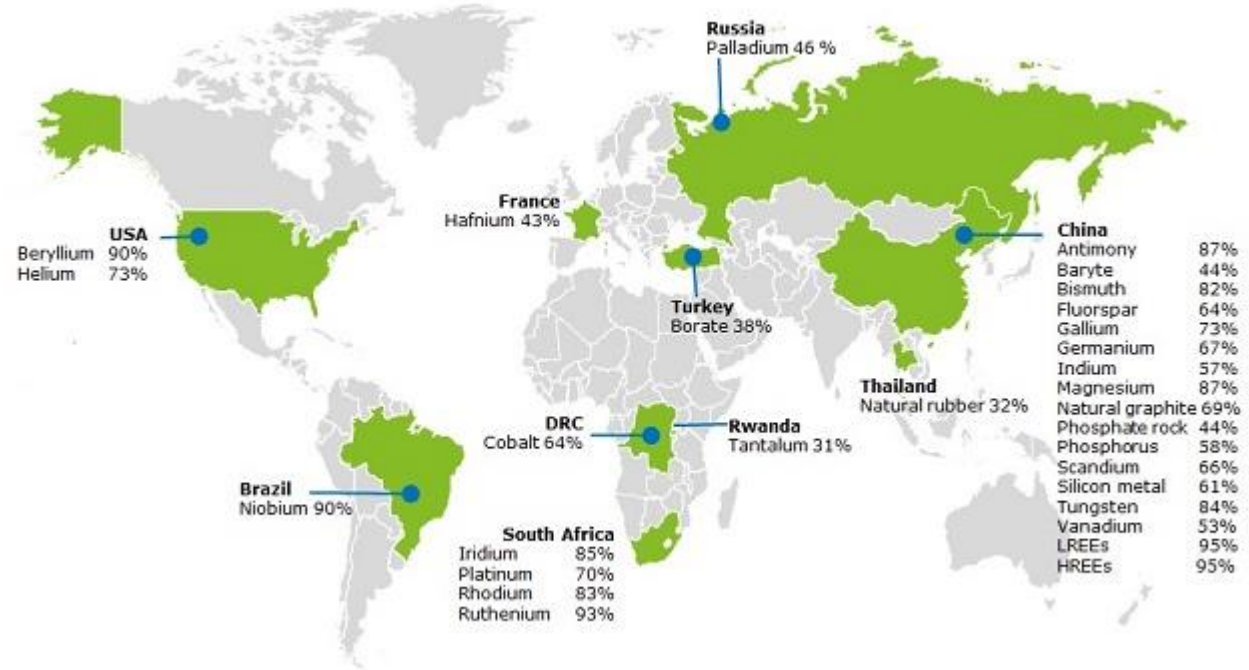


Figure 12 : Pays produisant le plus de matières premières critiques
[Source : Commission européenne, 2017]

III. LE REFERENTIEL ENVIRONNEMENTAL DU NUMERIQUE

L'élaboration du Référentiel Environnemental du Numérique (REN) vise à décrire, sous forme de grandeurs et ratios caractéristiques, l'empreinte environnementale de **l'écosystème numérique**, en termes d'équipements et d'usages.

Alors que la Transition Numérique s'amplifie tant dans les entreprises que dans la société toute entière, il est **indispensable** que notre **culture** numérique s'enrichisse de la connaissance et de la compréhension des impacts environnementaux de nos objets et de nos actes numériques.

Dans les **entreprises ou les organismes publics**, des démarches de type Green IT se sont souvent mises en place au sein des Directions des Systèmes d'Information ces quinze dernières années, et ont permis de faire progresser leur maturité sur ce sujet.

Mais ces progrès sont limités par la difficulté à trouver des **données** actualisées permettant de mener de façon précise les analyses d'impact environnemental , sauf à se plonger dans un vaste ensemble épars de travaux universitaires et de notices techniques et/ou à avoir recours à des sources payantes.

Ainsi que l'indiquait le rapport de l'ADEME « *Potentiel de contribution du numérique à la réduction des impacts environnementaux : état des lieux et enjeux pour la prospective* » en 2016 :

> *« (…) les données sur les équipements sont fréquemment anciennes et se basent sur un seul modèle d'appareil. De fait, dans la mesure où il s'agit d'appareils complexes, aux évolutions technologiques rapides, la collecte de données environnementales les concernant est peu aisée. »*

Par ailleurs, alors que le Numérique devient omniprésent au sein des organisations, le Green IT reste, au mieux, un enjeu des seules Directions des systèmes d'information (DSI).

Selon le rapport *« Baromètre Green IT 2017 »* de l'Alliance Green IT, *« (…) le Green IT n'a toujours pas conquis la gouvernance d'entreprise. Moins d'un quart ont intégré le Green IT au sein de leur stratégie. »*

D'après l'étude du CIGREF *« Du Green IT au Green by IT »* parue en 2017 : *« L'informatique propose des projets mais ce ne sont généralement que des projets d'infrastructures, data centers, réseaux, systèmes d'exploitation, externalisation du développement, projets d'infrastructure ou de gouvernance interne. »*

Or, ces projets d'infrastructure informatique sont la conséquence de décisions prises en matière de conception de produits, d'organisation, d'arbitrages de portefeuille d'activités qui ne sont pas du ressort des DSI, alors qu'elles sont pourtant de plus en plus prises au sein d'initiatives de Transition Numérique, ou d'approches « 4.0 ».

Les décisions se sont déplacées vers les responsables d'activités et les dirigeants, le Numérique n'étant plus considéré seulement comme un moyen au service d'une stratégie, mais comme une partie intégrante de cette stratégie et comme le catalyseur de la transformation permettant de s'adapter à un nouvel environnement.

Il arrive même que des choix purement technologiques se prennent en dehors de la DSI (ce que l'on désigne par « shadow IT »), ce qui n'est évidemment pas sain à terme, ni pour garantir la pérennité des réalisations ni dans la perspective de minimiser l'impact environnemental du Numérique.

Il est donc nécessaire de disposer de données techniquement vérifiées accessibles à de non-spécialistes (ni du Numérique ni de la transition énergétique), afin d'assurer tout à la fois la juste prise de conscience des enjeux et l'intégration des impacts environnementaux du Numérique dans la définition des stratégies, le choix des formes d'organisation et des modalités d'innovation.

Cette nouvelle configuration, que ce Référentiel vise à contribuer à établir, renforcera également la légitimité des DSI et des DDD pour conseiller les directions générales en matière de pilotage environnemental de la transition du Numérique.

A. PERIMETRE DU REFERENTIEL

L'empreinte environnementale de l'écosystème numérique y est caractérisée au travers de la quantification de :

- La consommation énergétique ou électrique (suivant la pertinence de l'une ou l'autre au vu du cas considéré),
- Les émissions de Gaz à Effet de Serre (GES),
- La consommation de matières premières métalliques critiques.

Les éléments choisis pour représenter **l'écosystème numérique** sont de deux types

- Équipements (ou groupes d'équipements),
- « Actions numériques » (utilisations typiques d'un équipement).

Les **équipements** numériques retenus dans le REN sont les suivants [16]:

- smartphone,
- ordinateur portable,
- data center,
- télévision connectée.

Les **actions** numériques sont des activités réalisées via des équipements numériques et impliquant une utilisation du réseau. Les actions retenues dans le REN sont les suivantes :

- envoyer un mail,
- regarder une vidéo en ligne.

NB. Les résultats présentés dans ce rapport intermédiaire ne concernent que la production et la phase d'utilisation équipements ; les travaux relatifs aux actions numériques sont encore en cours et donneront lieu à publication ultérieure.

B. LES PRINCIPALES HYPOTHESES DE CALCUL

Hypothèses pour les smartphones

Les impacts affichés sont donnés pour un smartphone moyen, correspondant à une moyenne effectuée sur plusieurs marques (constructeurs principaux en termes de parts de marché) et modèles de milieux de gamme. Récents. Le profil d'utilisation est calibré à partir d'études statistiques sur les usages actuels au niveau mondial selon les classes d'âge.

Hypothèses pour les ordinateurs portables

Les impacts affichés sont donnés pour un ordinateur portable moyen, correspondant à une moyenne effectuée sur plusieurs marques (constructeurs principaux en termes de parts de marché) et modèles de milieux de gamme

[16] Cette liste sera complétée dans une version ultérieure, notamment en prenant en compte les impacts liés au réseau

récents. Le profil d'utilisation est professionnel, un usage professionnel correspondant aux études effectuées par le label gouvernemental américain «Energy Star».

Hypothèses pour les centres de données

Les impacts affichés sont donnés pour un centre de données moyen, arbitrairement caractérisé par sa superficie et la capacité en puissance totale de ses installations (en MW) :

Surface du centre de données moyen : 1000 m² ;

Puissance du centre de données moyen : 1 MW ;

PUE (Power Usage Effectiveness) : 2.

Hypothèses pour les télévisions connectées

Les impacts affichés sont donnés pour une TV connectée à écran LED, correspondant à une moyenne effectuée sur plusieurs marques (constructeurs principaux en termes de parts de marché) et modèles de milieux de gamme (écrans de 50 à 60 pouces).

Exemples de caractérisations d'actions numériques

L'action « Envoyer un mail » est caractérisée comme suit :

Temps d'utilisation du terminal associé : 5 minutes ;

Taille des données transmises (dont pièce jointe) : 1 Mo.

L'action « Regarder une vidéo en ligne » est caractérisée comme suit :

Temps d'utilisation du terminal associé : 10 minutes ;

Taille des données transmises (vidéo de qualité 1080p) : 170 Mo.

C. REN, PHASE DE PRODUCTION, PREMIERS RESULTATS

1. Consommation d'énergie

L'analyse de la phase **production** des équipements fait apparaître les très fortes quantités **d'énergie** et d'eau utilisées, d'autant plus fortes que le degré de miniaturisation est important :

REN : Référentiel Environnemental du Numérique *Production Phase*			
Impacts	Equipments		
	Laptop	Smartphone	Connected TV
Primary Energy (MJ)	6640	717	5700
GHG ($kgCO_2e$)	514	61,1	441
Water (Litres)	3435	500	2644
Metals: Gallium [Ga] (mg)	7,6	0,5	200
Metals: Indium [In] (mg)	17,5	7	1210
Metals: Tantalum [Ta] (mg)	540	45	
Metals: Copper [Cu] (g)	171	20	885
Metals: Cobalt [Co] (g)	12	5,8	
Metals: Palladium [Pd] (mg)	0,1	5	
Quantities			
Installed base in 2017 (Million units)	1000	4000	2200
Annual production (Million units)	163	1570	270

Tableau 5 : Référentiel environnemental du numérique (REN), Production Phase
[Source: calculé par The Shift Project]

Ainsi, produire un smartphone pesant 140 grammes requiert environ 700 MJ d'énergie primaire alors qu'il faut, selon l'ADEME, environ 100 GJ pour produire une voiture à essence de 1400 kg. Il faut donc consommer environ 70 fois plus d'énergie pour produire un « gramme de smartphone » que pour produire un « gramme de voiture ». A noter que la consommation d'énergie augmente également lors du recyclage car l'énergie de séparation des métaux est fonction de la complexité d'assemblage.

2. Émissions de gaz à effet de serre (GES)

En ce qui concerne la production de GES**,** quelques ratios et comparaisons sont utiles pour prendre conscience des impacts :

- la production d'un smartphone engendre des émissions 400 fois plus lourdes que son usage ;
- en considérant que l'on utilise un smartphone de l'âge de 10 ans à l'âge de 80 ans en France, et que l'on en change tous les deux ans, on aura ainsi « généré » de ce fait environ deux tonnes de GES, soit l'équivalent de 200 000 km parcourus en train, soit encore le trajet aller-retour domicile travail d'un habitant d'un département de Grande Couronne pendant toute sa vie professionnelle.

En outre, la **tendance** au cours de ces dernières années est préoccupante, puisque l'intensité carbone des smartphones a **augmenté** à chaque fois qu'une nouvelle génération de smartphones est apparue, comme le montre le graphique suivant :

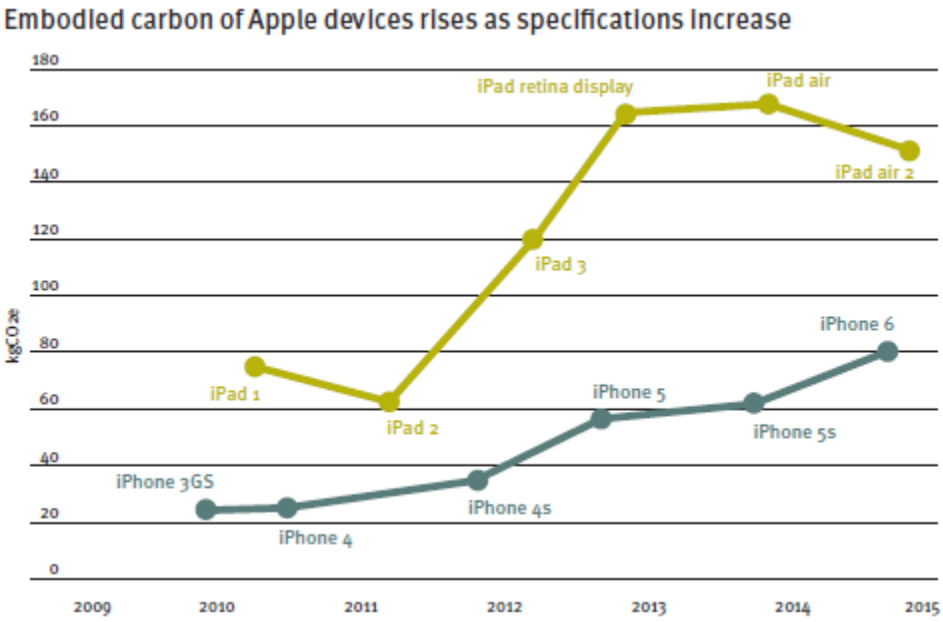


Figure 13 : Empreinte carbone des produits Apple à mesure que les spécifications augmentent
[Source: Benton, Hazell et Coats, 2015]

Cette tendance est confirmée à la vue des modèles les plus récents: l'empreinte carbone de l'Iphone X[17] est de 93 $kgCO_2eq$ tandis que celle de l'Apple Watch[18] est de 38 $kgCO_2eq$, sachant que celle-ci s'ajoute à celle d'un Iphone (Apple, 2018).

3. Consommation de métaux

À noter que les données concernant la consommation de métaux sont difficiles à obtenir et à synthétiser, car elles exigent de décomposer très finement la structure physique des appareils, et de recourir à des sources d'information diverses et spécialisées :

- laptop : il s'agit de données de Bill of Materials fournies par le logiciel EIME[19] (donc fonction des modèles présents dans la base de données du logiciel), mises à jour pour le gallium et l'indium ;
- smartphone : il s'agit de données d'inventaire d'ACV (Analyse de Cycle de Vie) couplées à des déclarations matières (donc fonction des données déclarées par les fabricants de composants électroniques), mises à jour pour le gallium et l'indium ;
- connected TV : il s'agit de données d'une EPD (Environmental Product Declaration) pour une TV LCD à backlight LED de 55 pouces. La quantité d'indium est calculée en fonction de la surface de la dalle et, pour le gallium en fonction du nombre de LED de backlight. Pour le cuivre, il s'agit d'une évaluation selon la quantité de minerai (fourni dans l'EPD) et la richesse moyenne du minerai de cuivre actuellement.

La fabrication annuelle totale de smartphones utilise environ 9000 tonnes de cobalt, soit environ 10% de la production totale de ce métal. Quant à l'indium, la fabrication annuelle des téléviseurs connectés en nécessite environ 330 tonnes, soit 50% de la production mondiale de ce métal.

D. REN, PHASE D'UTILISATION, PREMIERS RESULTATS

1. Consommation d'énergie

L'analyse de la phase utilisation des équipements montre tout d'abord que la consommation d'énergie est **nettement plus faible que celle de la phase production pour les équipements périphériques**.

[17] Iphone X 256GB
[18] Apple Watch Series 3 (GPS + Cellular) 42mm Stainless Steel Case with Sport Band
[19] Logiciel d'Analyse du Cycle de Vie développé à l'initiative d'industriels des secteurs Électrique et Électronique

REN: Référentiel Environnemental du Numérique *Run Phase*				
Yearly impacts	Equipments			
	Laptop	Smartphone	Data Center	Connected TV
Electricity usage (kWh)	56	5,9	6 GWh	157
GHG - France (kgCO2e)	2	0,2	224 t	5
GHG - EU (kgCO_2e)	15,4	1,6	1780 t	43
GHG - USA (kgCO_2e)	27,5	2,9	3180 t	78
GHG - China (kgCO_2e)	38,0	4,0	4390 t	107
Quantities				
Installed base in 2017 (Million units)	1000	4000	47 *	2200
Annual production (Million units)	163	1570	11 *	270

Tableau 6 : Référentiel environnemental du numérique (REN), Run Phase
[Source: calculé par The Shift Project]

En effet, si l'on prend en compte des durées de conservation de respectivement 2, 4 et 5 ans pour les smartphones, laptops et connected TVs, l'énergie directement consommée due à l'utilisation représente, en proportion de l'énergie directement consommée sur l'ensemble du cycle de vie du périphérique : 6% pour un smartphone, 11% pour un ordinateur portable et 33% pour un téléviseur.

Bien entendu, cette proportion change si l'on intègre l'énergie indirectement consommée par l'utilisation du périphérique, liée au trafic qu'elle génère dans le réseau et aux opérations qu'elle provoque dans les data centers. En ce qui concerne le smartphone, elle est alors de l'ordre de 50% (Ercan, 2013).

Dit autrement, la consommation d'énergie réelle durant le cycle de vie d'un smartphone est **33 fois plus importante que sa consommation électrique propre**, qui est la seule que l'utilisateur peut aujourd'hui éventuellement mesurer.

NB. Nous approfondirons et détaillerons ces analyses dans le rapport final, mais l'on voit bien ici la distorsion qui peut exister entre la réalité de l'empreinte énergétique du smartphone et la perception que l'utilisateur peut en avoir.

2. Émissions de gaz à effet de serre (GES)

Les émissions de GES sont bien sûr fortement dépendantes de la distribution géographique des parcs installés, à cause de mix électriques très contrastés selon les pays (IEA, 2017): 34,8 gCO_2eq/kWh en France contre 681 gCO_2eq/kWh en Chine, 493 gCO_2eq/kWh aux Etats-Unis, 425 gCO_2eq/kWh en Allemagne ou encore 276 gCO_2eq/kWh en Europe.

Si l'on procède à l'analyse de la proportion que représentent les émissions de GES directement dues à l'utilisation du périphérique par rapport aux émissions de GES directes sur l'ensemble de son cycle de vie avec les mêmes hypothèses de durées de conservation, on obtient d'ailleurs des résultats qui confirment ceux obtenus sur la consommation d'énergie mais cependant contrastés en fonction des régions d'utilisation :

GES poids de l'utilisation	France	Europe	US	Chine
smartphone	0,3%	2,6%	4,5%	6,2%
laptop	0,4%	2,9%	5,1%	6,9%
connected tv	1,1%	8,9%	15,0%	19,5%

Tableau 7 : Part de l'usage dans les émissions directes de GES
[Source: calculé par The Shift Project]

E. CONSTATS ET TENDANCES

Le parc de terminaux en forte croissance

Terminaux : une croissance forte mais contrastée

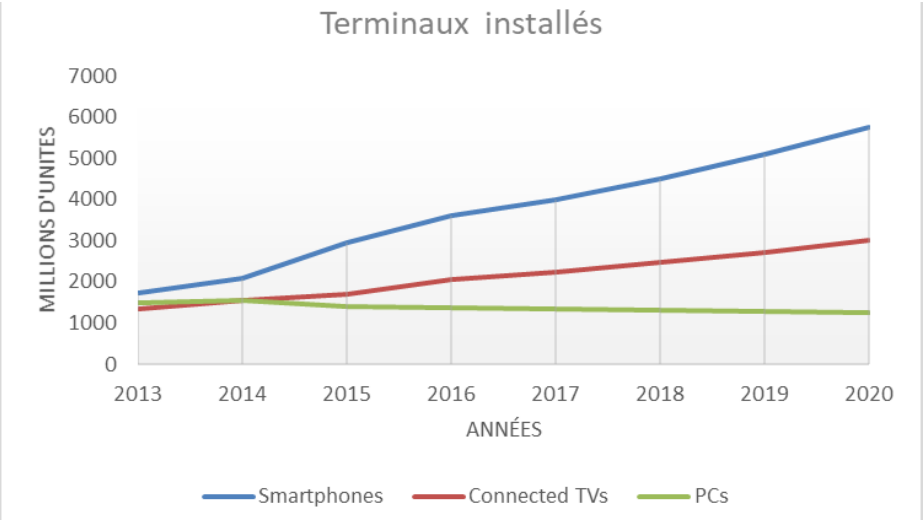


Figure 14 : Nombre de terminaux installés entre 2013 et 2020
[Source: calculé par The Shift Project à partir des données publiées par Cisco, 2017b]

La croissance des usages est tirée par la mobilité et la vidéo, et se traduit par des évolutions contrastées des parcs installés des différents terminaux :

- le nombre de smartphones passe de 1,7 milliard en 2013 à 5,8 milliards en 2020, en croissance de 11% par an ;
- le nombre de téléviseurs connectés est également en forte augmentation, passant de 1,3 milliard en 2013 à 3 milliards en 2020, en croissance de 9% par an, sachant par ailleurs que l'évolution vers le standard UHD (Ultra Haute Définition ou 4K), couplée avec l'augmentation de la taille des écrans, conduit à plus de consommation énergétique ;
- la croissance du parc d'ordinateurs portables ne compense pas tout à fait le déclin des ordinateurs fixes et résulte en une baisse de 2% par an du parc consolidé.

Terminaux : une croissance plus forte dans les régions à forte intensité carbone

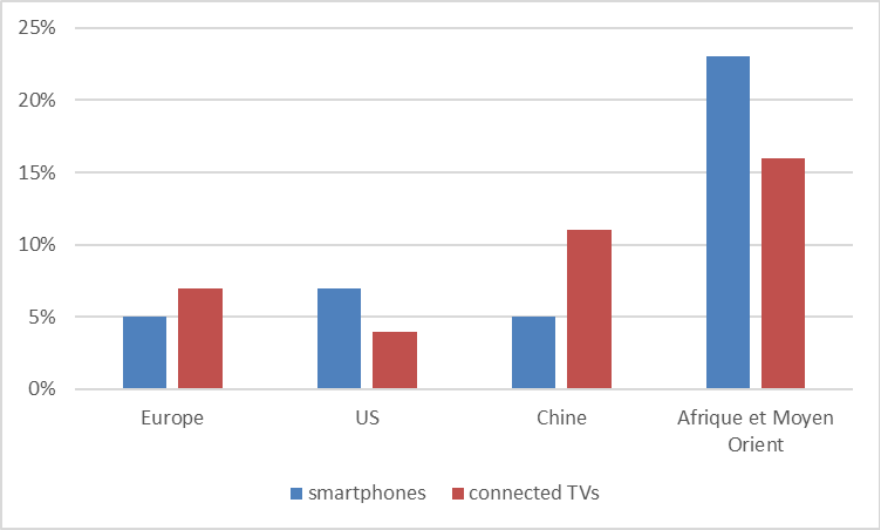


Figure 15 : Croissance annuelle des parcs installés de terminaux entre 2016 et 2021
[Source : Cisco, 2018b]

La croissance plus rapide des parcs de terminaux connectés dans les régions à forte intensité carbone va augmenter les émissions de GES dues au Numérique.

Data centers : des facteurs en concurrence

Les valeurs que nous indiquons pour les data centers correspondent à un site « moyen » (1000 m^2, puissance des équipements informatiques de 1MW, PUE=2). Étant donné les multiples variables impactant l'efficacité énergétique, le cas présenté ici doit être considéré comme illustratif et les résultats associés ne représentent pas une moyenne sur l'ensemble des data centers.

A titre de comparaison, la consommation annuelle d'un tel data center équivaut selon EDF à celle d'une ville française de 10000 habitants.

Les prévisions de tendance relatives à la consommation énergétique sont complexes. Elles résultent de la combinaison de multiples effets positifs et négatifs.

Parmi les effets positifs, il y a notamment :

- amélioration du PUE de chaque data center,
- amélioration de l'efficacité énergétique des serveurs,
- amélioration du taux d'utilisation des serveurs,
- amélioration de la linéarité de consommation des serveurs en fonction de la charge,
- concentration des serveurs dans des « hyper data centers ».

Et parmi les effets négatifs, il y a notamment :

- croissance du trafic,
- croissance du volume de données à stocker,
- croissance du volume d'opérations,
- création de data centers dans des régions à contexte technologique plus difficile,
- déconcentration de la puissance informatique, notamment liée à l'IIoT.

Cependant, même les études les plus optimistes font part d'inquiétudes sur la capacité des progrès technologiques à contrebalancer la croissance des volumes à l'horizon 2020. Par exemple ce rapport du Département américain de l'Énergie et l'Université de Californie sur la consommation d'énergie des data centers en 2016 aux États-Unis :

> *« Les leviers clés d'optimisation de l'efficacité énergétique [des data centers] identifiés dans ce rapport, meilleur PUE, meilleur taux d'utilisation des serveurs et meilleure linéarité de consommation ont tous des limites théoriques et pratiques et l'importance des progrès déjà enregistrés laisse penser qu'elles pourraient être atteintes à une échéance pas très lointaine. »* (Shehabi et *al.* 2016)

IV. PISTES DE REFLEXION POUR RECOMMANDATIONS FUTURES

Le Numérique peut servir à repenser les usages et modifier les modes de fonctionnement et de production pour aboutir à une réduction des émissions de GES, voire à une réduction de la consommation énergétique : réseaux électriques intelligents (smart grids), mobilité et transports intelligents, monitoring environnemental et urbain, dématérialisation, télétravail et visioconférence, bâtiments intelligents et écoconception logicielle. Mais ceci ne se produira qu'à la condition de maîtriser les « effets rebond ». Or, jusqu'ici, les effets rebond se sont montrés plus importants que les gains apportés par l'innovation technologique (Magee et Devezas, 2017). Ainsi les bénéfices du télétravail sont-ils largement inférieurs à ceux intuitivement escomptés, en tout cas lorsqu'il n'est pas combiné à d'autres changements de l'écosystème social.

Il est donc illusoire de considérer, ***a priori***, que le bilan énergétique global d'une transition numérique (d'un service, d'une entreprise, d'un pays) soit voué à être largement vertueux, voire même simplement équilibré.

Une transition numérique ***peut*** concourir à une réduction de la consommation d'énergie globale d'un système, mais à un certain nombre de conditions qui, du fait de nos habitudes de consommation et de simulations financières incomplètes, sont souvent insuffisamment remplies. Il faut donc progresser notamment sur les points suivants[20] :

Informer et faire prendre conscience

Accélérer la prise de conscience des impacts environnementaux du Numérique dans les entreprises et organisations publiques (via les DSI et les DDD), au sein du grand public (étiquetage) et dans la communauté de la Recherche.

Adopter la sobriété numérique comme principe d'action

Réduire l'empreinte énergétique et environnementale du Numérique passe par un retour à une capacité individuelle et collective à interroger l'utilité sociale et économique de nos comportements d'achat et de consommation d'objets et de services numériques, et à les adapter en conséquence.

Mobiliser le levier de la commande publique

Faire en sorte que les organismes publics intègrent ces impacts comme critères de décision dans leurs politiques d'achat et d'utilisation des équipements numériques, ceci dans les pays développés comme dans les pays en développement.

Permettre aux organisations de piloter environnementalement leur Transition Numérique

Faire en sorte que les entreprises et les organismes publics disposent de références et d'outils leur permettant de prendre en compte l'impact environnemental de la composante numérique des choix qu'elles envisagent, à différents niveaux de pilotage : direction générale lors de la définition des stratégies, direction d'entités lors de l'organisation des activités opérationnelles, direction des systèmes d'information pour la gestion des infrastructures numériques. Sur ce dernier point, il est décisif que des exigences d'efficacité énergétique soient clairement exprimées vis-à-vis des fournisseurs de services, notamment en matière de développement logiciel et de services dans le « Cloud ».

Améliorer la prise en compte des aspects systémiques du Numérique

Pousser à la prise en compte, grâce à des approches interdisciplinaires, de l'impact environnemental direct et indirect du Numérique, et de ses effets rebond au sein des initiatives de transition énergétique, notamment dans les secteurs de l'énergie, des transports, de l'habitat et de l'alimentation ; développer une expertise autour de cette approche pour accélérer sa mise en œuvre.

[20] Ces conditions seront précisées et déclinées de façon opérationnelle dans le rapport final du projet Lean ICT

Œuvrer à l'échelle européenne

Viser, compte tenu de l'envergure mondiale et de la puissance économique des acteurs principaux du Numérique, une mise en place de ces mesures à l'échelon européen.

Nous nous attacherons dans la suite du Projet à continuer à donner un contenu concret à ces pistes de recommandations, en liaison avec d'autres acteurs partageant cette vision.

V. TRAVAUX EN COURS

Nous poursuivons nos travaux sur l'ensemble des 3 objectifs du projet explicités au début du présent rapport intermédiaire. Plusieurs sous-groupes de travail ont été constitués, centrés sur les sujets suivants :

Sujet 1 : Poursuite du développement du Référentiel Environnemental du Numérique

Faire évoluer la version initiale en la complétant par la prise en compte :

- de nouveaux types de périphériques, significatifs de l'approche IOT ;
- des impacts indirects de l'utilisation des périphériques, dus au trafic qu'elle génère dans le réseau et aux opérations qu'elle provoque dans les data centers ;
- d'actions numériques significatives.

Sujet 2 : Simulateur d'impacts environnementaux du Numérique

Construire un modèle (simple) permettant de :

- quantifier, au sein d'une entreprise ou d'une organisation publique, les impacts énergétiques (puis d'émission de GES) des choix technologiques et des modes d'utilisation du Numérique ;
- de pouvoir étudier leur sensibilité à des leviers d'optimisation (achat des équipements et des logiciels, gestion des données, etc…) ;
- et décrire comment l'intégrer dans des outils de gestion et de pilotage.

Sujet 3 : Outils pour les investissements dans les Pays en Développement

Adapter le REN, le Simulateur et le concept de **sobriété numérique** à des contextes particuliers :

- élaboration de politiques publiques d'investissement et d'innovation ;
- évaluation de projets d'investissements dans le cadre d'un financement international ;
- définition d'un référentiel de bonnes pratiques pour les projets d'infrastructures et les initiatives de type « Smart ».

Nous avons également prévu, en appui de notre troisième objectif, d'approfondir notre compréhension des ressorts psychologiques et sociologiques qui sous-tendent la croissance du « tout numérique », afin d'identifier des mécanismes de régulation qui soient audibles sans pour autant être trop peu efficaces.

Enfin, et c'est l'un des objectifs principaux des Ateliers que nous organisons le 29 Mars, nous comptons utiliser ce rapport intermédiaire comme une plateforme permettant d'échanger avec les personnes et les organismes conscients de la nécessité de maîtriser les impacts environnementaux du Numérique, et de nous coordonner afin de renforcer l'efficacité de nos actions respectives de communication et de lobbying.

VI. CONCLUSIONS PROVISOIRES

A titre de conclusions provisoires, nous constatons tout d'abord que la Transition Numérique en cours résulte en une **augmentation forte de l'empreinte énergétique directe du Numérique**. Cette tendance est **préoccupante** à plusieurs égards.

- ➔ La comparaison du taux de croissance annuel de 8% de la consommation énergétique du Numérique que nous avons mis en évidence, avec l'évolution du chiffre d'affaires du secteur (environ 5%, Arthur D. Little, 2017) tend à montrer une augmentation de son intensité énergétique de presque 3% par an.

  Dit autrement, consommer un euro de Numérique en 2018 induit une consommation d'énergie directe supérieure de 35% à ce qu'elle était en 2010. Cette tendance est néfaste, car elle va à l'encontre des objectifs de découplage énergétique et climatique fixés par l'Accord de Paris et que se donnent les États.

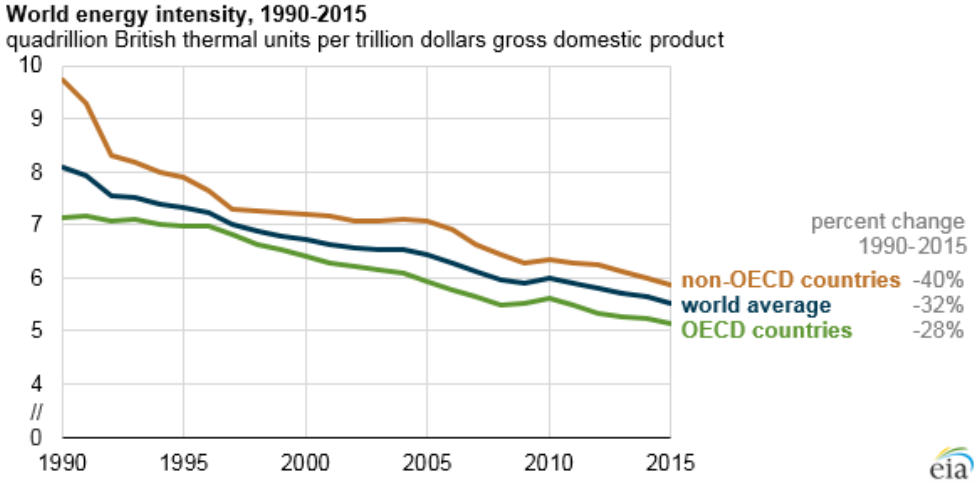


Figure 16 : Intensité énergétique mondiale
[Source: EIA, 2016]

- ➔ L'observation de l'évolution comparée du PIB mondial et des dépenses numériques montre par ailleurs un différentiel de croissance significatif en faveur du Numérique. Il est de l'ordre de 3 points en ce qui concerne la zone OCDE, ce qui illustre bien à la fois la réalité de la transition numérique dans ces pays et l'absence de traduction en accélération de la croissance économique.

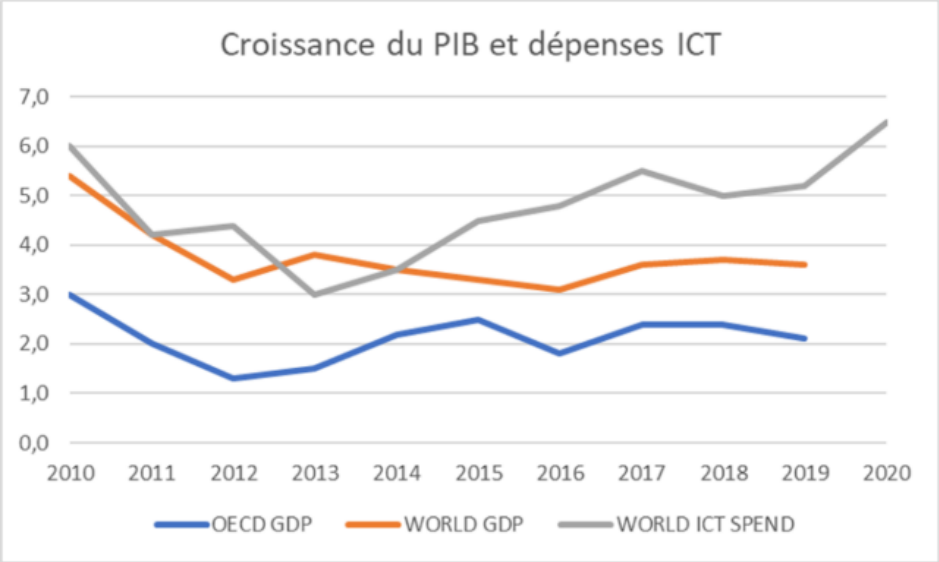


Figure 17 : Évolution comparée des taux de croissance des dépenses ICT et du PIB
[Source : IDC, 2017c]

Le poids croissant du Numérique rend donc d'autant plus justifié le besoin de comprendre et réguler son impact énergétique direct.

- L'accélération de la croissance du Numérique n'ayant pas aujourd'hui l'effet espéré ni sur la croissance mondiale (ni celle de l'OCDE) ni sur la productivité (Byrne et Corrado, 2017), il est donc d'autant plus important **d'évaluer l'apport effectif de la Transition Numérique à la capacité des secteurs les plus énergivores (Electricité, Transports, Batiments) à le devenir moins.**

Deux autres constats guideront nos travaux dans les mois qui viennent :

- La Transition Numérique s'accompagne de mutations psycho-sociétales qui rendent illusoire toute approche trop exclusivement technologique ou économique. Il est donc nécessaire de concevoir des solutions en prenant en compte les dimensions sociologiques et psychologiques conditionnant l'acceptabilité d'une **sobriété numérique**.
- La **dépendance** des technologies numériques à un certain nombre de métaux, relativement rares et sous le quasi-monopole d'une super puissance, et à des logiciels et algorithmes développés très majoritairement par des entreprises implantées sur le territoire d'une autre super puissance, nécessite d'accompagner ces préoccupations de sobriété par des objectifs de **résilience**.

VII. ANNEXES

A. ANNEXE 1 : CONSOMMATION ENERGETIQUE DU NUMÉRIQUE 2015-2020

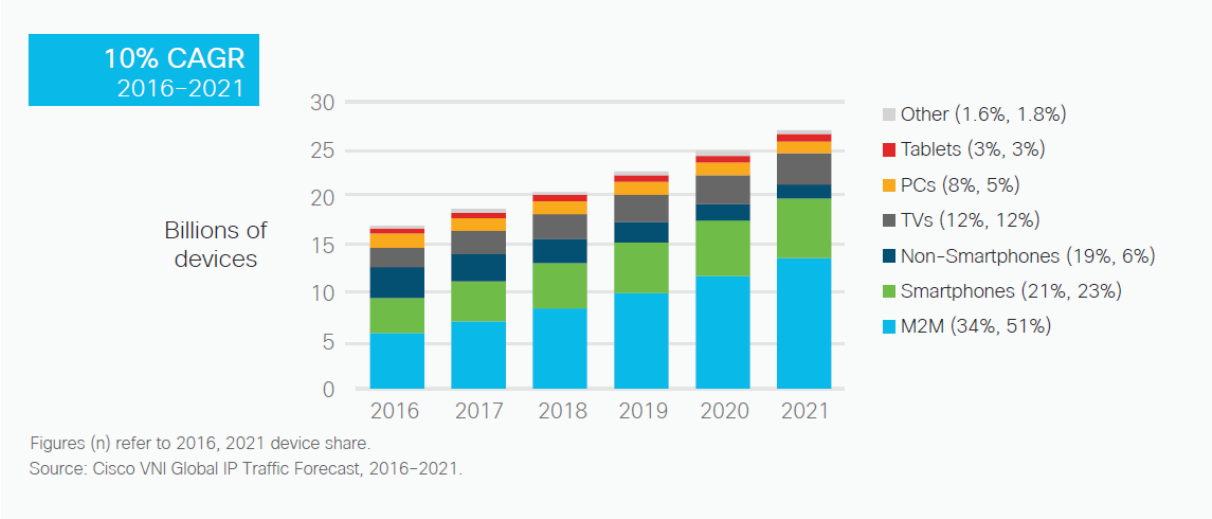
Expected updated							
CONSOMMATION ELECTRIQUE EN TWh	**2013**	**2014**	**2015**	**2016**	**2017**	**2020**	**CAGR 2015/2020**
TERMINAUX ET PERIPHERIQUES	366	425	444	502	537	677	**9,0%**
RESEAUX	435	433	463	471	478	619	**6,0%**
DATA CENTERS	335	334	416	518	617	800	**14,0%**
TOTAL LIE A L'USAGE	**1136**	**1192**	**1323**	**1491**	**1632**	**2096**	**9,5%**
U: % CONSOMMATION ELECTRIQUE GLOBALE	**5,8%**	**6,0%**	**6,5%**	**7,2%**	**7,8%**	**9,0%**	
PRODUCTION	965	1041	1127	1244	1452	1681	**8,4%**
P: % CONSOMMATION ELECTRIQUE GLOBALE	**5,0%**	**5,2%**	**5,6%**	**6,0%**	**6,9%**	**7,2%**	
TOTAL USAGE ET PRODUCTION	**2101**	**2234**	**2450**	**2735**	**3083**	**3777**	**9,0%**
% CONSOMMATION ELECTRIQUE GLOBALE	**10,8%**	**11,2%**	**12,1%**	**13,3%**	**14,7%**	**16,3%**	
% EMISSIONS DE GES	**2,1%**	**2,2%**	**2,3%**	**2,5%**	**2,8%**	**3,2%**	

Source : calculé par The Shift Project à partir des données publiées par d'Andrae et Edler (2015)

Higher growth and more efficiency							
CONSOMMATION ELECTRIQUE EN TWh	**2013**	**2014**	**2015**	**2016**	**2017**	**2020**	**CAGR 2015/2020**
TERMINAUX ET PERIPHERIQUES	325	363	388	448	484	620	**10,0%**
RESEAUX	435	433	463	471	478	661	**7,5%**
DATA CENTERS	323	322	416	443	468	577	**7,0%**
TOTAL LIE A L'USAGE	**1082**	**1118**	**1267**	**1361**	**1430**	**1858**	**8,0%**
U: % CONSOMMATION ELECTRIQUE GLOBALE	**5,6%**	**5,6%**	**6,3%**	**6,6%**	**6,8%**	**8,0%**	
PRODUCTION	963	1039	1127	1233	1430	1655	**8,0%**
P: % CONSOMMATION ELECTRIQUE GLOBALE	**4,9%**	**5,2%**	**5,6%**	**6,0%**	**6,8%**	**7,1%**	
TOTAL USAGE ET PRODUCTION	**2046**	**2157**	**2394**	**2594**	**2861**	**3512**	**8,0%**
% CONSOMMATION ELECTRIQUE GLOBALE	**10,5%**	**10,9%**	**11,9%**	**12,6%**	**13,6%**	**15,1%**	
% EMISSIONS DE GES	**2,0%**	**2,1%**	**2,2%**	**2,4%**	**2,5%**	**3,0%**	

Source : calculé par The Shift Project à partir des données publiées par d'Andrae et Edler (2015)

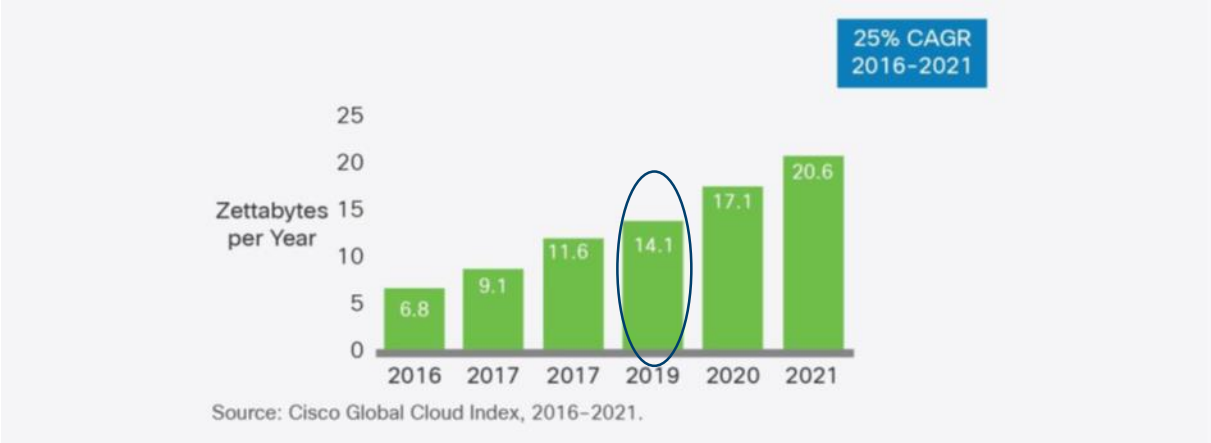
B. ANNEXE 2 : EVOLUTION DU PARC DE TERMINAUX COMMUNICANTS



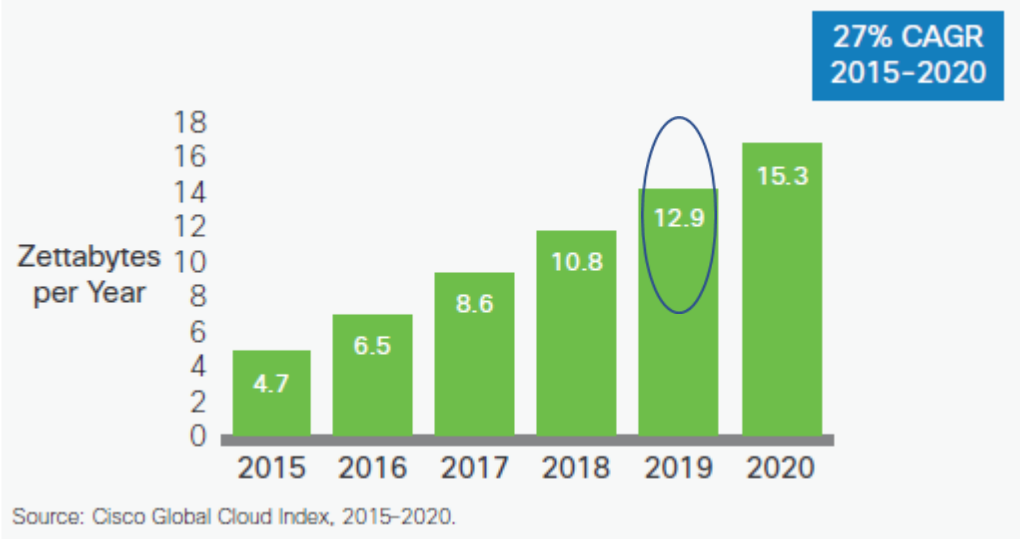
Source : Cisco VNI 2016

C. ANNEXE 3 : EVOLUTION DU TRAFIC DES DATA CENTERS ET DES RESEAUX

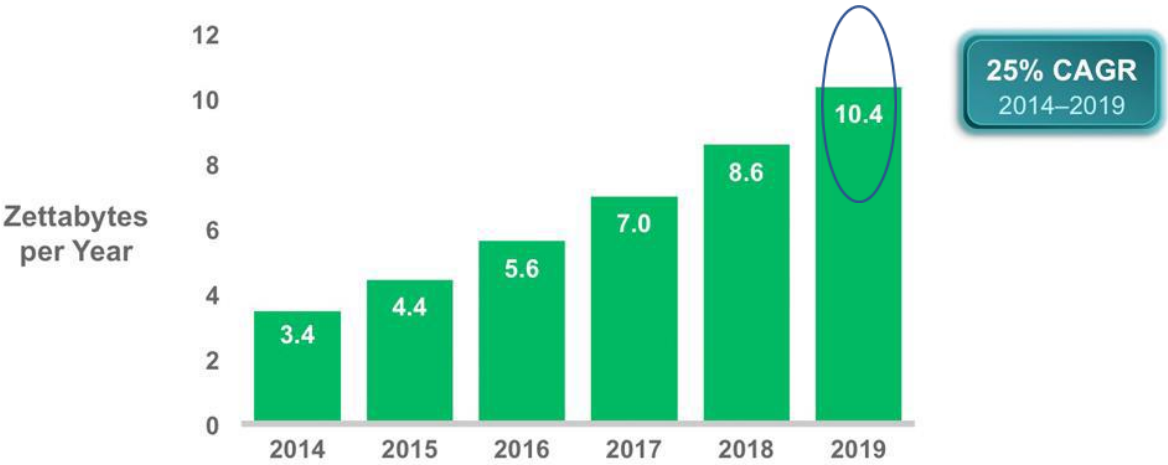
1. Prévisions en 2017 [Cisco VNI 2017]



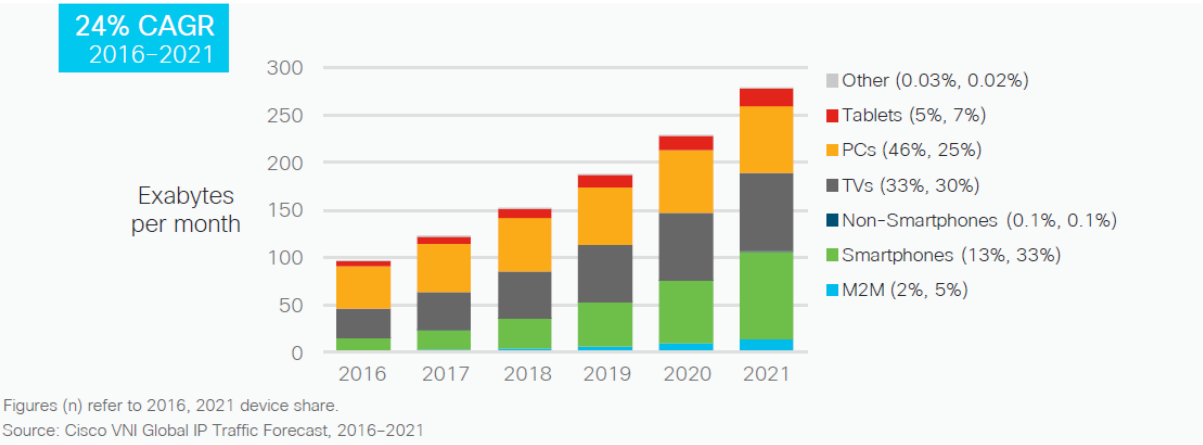
2. Prévisions en 2016 [Cisco VNI 2016]



3. Prévisions en 2015 [Cisco VNI 2015]



4. Trafic IP sur les réseaux [Cisco VNI 2015]



VIII. REFERENCES

Andrae, A., & Edler, T. (2015). On Global Electricity Usage of Communication Technology: Trends to 2030. *Challenges*, 117 - 157.

Apple. (2018). *Rapports sur les caractéristiques environnementales des produits.* consulté 23/04/2018: sur: https://www.apple.com/fr/environment/reports/.

Arthur D. Little. (2017). *Economie des Télécoms .* Fédération Française des Télécoms. sur: https://www.fftelecoms.org/app/uploads/2017/12/171217-FFT-Etude-Economie-des-T%C3%A9l%C3%A9coms-2017-Pr%C3%A9sentation.pdf.

Baldé, C.P., Wang, F., Kuehr, R., Huisman, J. (2015). *The global e-waste monitor – 2014.* Bonn, Germany: United Nations University, IAS – SCYCLE.

Banque mondiale. (2016). *« Rapport sur le développement dans le monde 2016 : Les dividendes du numérique. ».* Washington: Abrégé. Licence : Creative Commons Attribution CC BY 3.0 IGO.

Banque mondiale. (2017). *The Growing Role of Minerals and Metals for a Low Carbon Future.* Washington, DC: World Bank Publications, The World Bank Group.

Benton, D., Hazell, J., & Coats, E. (2015). *A circular economy for smart devices.* London: Green Alliance.

Bihouix, P. (2015). Les métaux dans les TICs. *10 ans EcoInfo : "Vers une informatique éco-responsable ?" 23 avril CNRS Paris.* sur: http://ecoinfo.imag.fr/wp-content/uploads/2015/04/avril_2015_conference_ecoinfo_cnrs_metaux_dans_les_tic-img800q90.pdf.

Byrne, D., & Corrado, C. (2017). *ICT Prices and ICT Services: What do they tell us about Productivity and Technology?* Washington. Board of Governors of the Federal Reserve System, https://doi.org/10.17016/FEDS.2017.015.: Finance and Economics Discussion Series 2017-015.

Cisco. (2014). *Visual Networking Index: Mobile Forecast Highlights, Global - 2018 Forecast Highlights.* sur: http://www.anatel.org.mx/docs/interes/Cisco_VNI_Forecast_and_Methodology.pdf.

Cisco. (2016a). *Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2015–2020.* sur: https://www.cisco.com/c/dam/m/en_in/innovation/enterprise/assets/mobile-white-paper-c11-520862.pdf.

Cisco. (2016b). *Visual Networking Index: Mobile Forecast Highlights, Global - 2020 Forecast Highlights.* sur: https://www.cisco.com/c/dam/m/en_us/solutions/service-provider/vni-forecast-highlights/pdf/Global_2020_Forecast_Highlights.pdf.

Cisco. (2017). *Visual Networking Index: Global - 2021 Forecast Highlights.* sur: https://www.cisco.com/c/dam/m/en_us/solutions/service-provider/vni-forecast-highlights/pdf/Global_2021_Forecast_Highlights.pdf.

Cisco. (2017a). *The Zettabyte Era: Trends and Analysis, Whitepaper.* sur https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/vni-hyperconnectivity-wp.pdf.

Cisco. (2017b). *Cisco Visual Networking Index: Forecast and Methodology, 2016–2021.* sur https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/complete-white-paper-c11-481360.pdf.

Cisco. (2018). *Cisco Global Cloud Index, Forecast and Methodology 2016–2021, Whitepaper.* sur https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/global-cloud-index-gci/white-paper-c11-738085.pdf.

Cisco. (2018b). *VNI Mobile Forecast Highlights, 2016-2021.* sur https://www.cisco.com/assets/sol/sp/vni/forecast_highlights_mobile/.

Commission européenne. (2017). *Study on the review of the list of Critical Raw Materials, Criticality Assessments.* Luxembourg: Publications Office of the European Union.

Commission Européenne. (2018, Consulté le 03/02/2018). Marché unique numérique. *sur https://ec.europa.eu/commission/priorities/digital-single-market_fr*.

EIA. (2016). *Global energy intensity continues to decline.* consulté 23/04/2018: sur https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=27032.

Ercan, E. M. (2013). *Global Warming Potential of a Smartphone: Using Life Cycle.* Stockholm: MSc thesis report, KTH Royal Institute of Technology, TRITA-IM-EX 2013:01.

Gaillard, J.-P. (2018). *Enfants et adolescents en mutation: Mode d'emploi pour les parents, éducateurs, enseignants et thérapeutes.* Paris: ESF.

Gartner. (2017). *Gartner Says 8.4 Billion Connected "Things" Will Be in Use in 2017, Up 31 Percent From 2016.* sur: https://www.gartner.com/newsroom/id/3598917, consulté 27/04/2018.

Gartner. (2018a). *Gartner Says Worldwide Device Shipments Will Increase 2.1 Percent in 2018. 29/01/2018.* consulté le 23/04/2018: https://www.gartner.com/newsroom/id/3859963.

Gartner. (2018b). *Gartner Forecasts Worldwide Public Cloud Revenue to Grow 21.4 Percent in 2018. (12/04/2018).* sur https://www.gartner.com/newsroom/id/3871416.

Gossart, C. (2015). Rebound effects and ICT : a review of the literature. Dans *ICT innovations for sustainability* (pp. 435 - 448). Springer.

GSMA. (2015). *The Impact of the Internet of Things: The Connected Home.* https://www.gsma.com/newsroom/wp-content/uploads/15625-Connected-Living-Report.pdf.

Halloy, J. (2018). More than an energy issue, we have a problem of materials. *4th Science and Energy Seminar at Ecole de Physique des Houches, March 4th-9th 2018* (p. 40). Les Houches: sur: http://science-and-energy.org/wp-content/uploads/2018/03/JH-Les-Houches-2018.pdf.

HPE. (2018). *En quoi consiste Edge Computing ?* Consulté 23/04/2018: sur https://www.hpe.com/fr/fr/what-is/edge-computing.html.

IDC. (2017a). *IDC Worldwide Quarterly Mobile Phone Tracker, May 30, 2017.* sur: https://www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=prUS42628117.

IDC. (2017b, Decembre 5). IDC Forecasts Worldwide Spending on the Internet of Things to Reach $772 Billion in 2018. *IDC Media Center*, pp. sur: https://www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=prUS43295217, consulté 23/04/2018.

IDC. (2017c). *IDC State of the Market 4Q17: IT Spending Review and Outlook.* sur: https://www.idc.com/getfile.dyn?containerId=US43580218&attachmentId=47309569, consulté le 27/04/2018.

Iddri, FING, WWF France, GreenIT.fr. (2018). *Livre blanc Numérique et Environnement.*

IEA. (2017). *IEA Headline Global Energy Data (2017 Edition).* Paris: sur http://www.iea.org/media/statistics/IEA_HeadlineEnergyData_2017.xlsx.

Lepesant, G. (2018). *La Transition Énergétique face au défi des métaux critiques.* Paris: Etudes de l'Ifri, Ifri.

Les Echos. (2016, consulté le 23/04/2018). Le numérique, promesse de développement pour l'Afrique. *sur https://www.lesechos.fr/idees-debats/cercle/cercle-157088-le-numerique-promesse-de-developpement-pour-lafrique-1223470.php*.

Magee, C. L., & Devezas, T. (2017). A simple extension of dematerialization theory: Incorporation of technical progress and the rebound effect. *Technological Forecasting & Social Change*, 196 - 205.

Santarius, T., Walnum, H., & Aall, C. (2016). *Rethinking Climate and Energy Policies—New Perspectives on the Rebound Phenomenon.* New York: Springer.

Shehabi, A., Smith, S.J., Horner, N., Azevedo, I., Brown, R., Koomey, J., Masanet, E., Sartor,. (2016). *United States Data Center Energy Usage Report.* Berkeley, California: Lawrence, Berkeley National Laboratory.

Techradar. (2015). *"The data capacity gap: why the world is running out of data storage".* Consulté 23/04/2018: sur https://www.techradar.com/news/computing-components/storage/the-data-capacity-gap-why-the-world-is-running-out-of-data-storage-1284024.

The Shift Project. (2016). *Les INDC et le budget carbone – Simulation de trajectoires d'émission compatibles avec le budget carbone +2°C.* sur https://theshiftproject.org/wp-content/uploads/2017/12/note_danalyse_les_indc_et_le_budget_carbone_the_shift_project_0.pdf.

Union Internationale des télécommunications. (2012). *Présentation générale de l'Internet des objets.* Recommandation UIT-T Y.2060.

THE SHIFT PROJECT, THINK TANK DE LA TRANSITION CARBONE

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. The Shift Project est soutenu par de grandes entreprises qui veulent faire de la transition énergétique leur priorité stratégique.

Contact : communication@theshiftproject.org

LE MODÉLISATEUR PRINCIPAL, CHARGÉ DE PROJET

Maxime Efoui-Hess est un ingénieur spécialiste du climat et de la modélisation. Il est diplômé du parcours Energie, Transport, Environnement de l'ISAE-SUPAÉRO.

Contact : maxime.efoui@theshiftproject.org

LA DIRECTRICE DES PROJETS DU SHIFT

Zeynep Kahraman, Directrice des projets, est économiste et économètre diplômée de la Toulouse School of Economics. Elle a rejoint *The Shift Project* en 2011 comme Cheffe de Projet en charge du développement du Portail de données énergie-climat du *Shift* et travaillé, avec Gaël Giraud, sur un projet de recherche en économie, dont l'objectif est de démontrer la relation entre consommation d'énergie et PIB. Elle a également coordonné l'élaboration des neuf propositions du *Shift Project* pour que l'Europe change d'ère », cf. Zeynep Kahraman, André-Jean Guérin, Jean-Marc Jancovici, *Décarbonons ! 9 propositions pour que l'Europe change d'ère*, Odile Jacob, 2017.

Contact : zeynep.kahraman@theshiftproject.org

LE DIRECTEUR DU GROUPE DE TRAVAIL

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*.

Contact : hugues.ferreboeuf@theshiftproject.org

THE SHIFT PROJECT

THE CARBON TRANSITION THINK TANK

www.theshiftproject.org