

# Maîtriser la consommation du numérique : le progrès technologique n'y suffira pas

Liliane Dedryver  
avec l'aide de Joël Hamelin, Vincent Couric  
et Julien Farella-Champeix



**FRANCE STRATÉGIE**  
ÉVALUER. ANTICIPER. DÉBATTRE. PROPOSER.





**FRANCE STRATÉGIE**

ÉVALUER. ANTICIPER. DÉBATTRE. PROPOSER.

# **Maîtriser la consommation énergétique du numérique : le progrès technologique n’y suffira pas**

---

**Document de travail**

Liliane Dedryver

avec l’aide de Joël Hamelin, Vincent Couric  
et Julian Farella-Champeix

Octobre 2020



## Table des matières

<b>Résumé.....</b>	<b>5</b>
<b>Chapitre 1 – Accélération de la numérisation de nos sociétés .....</b>	<b>7</b>
<b>1. Des changements comportementaux.....</b>	<b>7</b>
1.1. Tendances constatées sur le marché français.....	7
1.2. Les dynamiques françaises s’inscrivent dans des tendances mondiales similaires .....	10
1.3. Croissance en corollaire du nombre d’équipements connectés à internet.....	10
<b>2. ... à l’origine d’une explosion du trafic IP et dans les data centers.....</b>	<b>11</b>
2.1. Les évolutions du trafic IP mondial.....	12
2.2. Une sollicitation accrue des data centers.....	17
<b>Chapitre 2 – Comprendre l’évolution de la consommation énergétique             du numérique .....</b>	<b>21</b>
<b>1. Quel bilan de la consommation énergétique du numérique ?.....</b>	<b>21</b>
1.1. Comment sont construits les chiffres de la consommation du numérique .....	22
1.2. Évolution de la consommation globale du numérique entre 2013 et 2017.....	24
1.3. Évolutions possibles de la consommation du numérique à horizon 2025.....	26
1.4. Le numérique représente une part croissante de la consommation énergétique mondiale.....	28
1.5. Des émissions de gaz à effet de serre supérieures à celles du transport aérien civil .....	30
1.6. Conclusion.....	31
<b>2. Focus sur la consommation énergétique de deux technologies émergentes .....</b>	<b>31</b>
2.1. La consommation énergétique des crypto-monnaies reposant sur des blockchains publiques .....	32
2.2. L’internet des objets, une nouvelle inconnue dans l’évaluation de la consommation énergétique du numérique .....	40
2.3. Conclusion.....	55
<b>Chapitre 3 – Insuffisance du progrès technologique pour maîtriser             la consommation énergétique du numérique.....</b>	<b>57</b>
<b>1. Comprendre l’impact du progrès technologique dans la consommation             des réseaux de télécommunications .....</b>	<b>57</b>

1.1. Fonctionnement des réseaux télécoms.....	57
1.2. Comprendre la consommation énergétique des réseaux.....	59
1.3. L'incitation économique croissante des opérateurs à optimiser la consommation énergétique de leurs réseaux .....	59
1.4. Des nouvelles générations de réseaux à l'efficacité énergétique renforcée .....	60
1.5. Limites opérationnelles à la maîtrise de la consommation par le progrès technologique.....	66
1.6. Les effets rebonds liés au développement des usages .....	69
1.7. Conclusion.....	73
<b>2. Comprendre l'impact du progrès technologique dans la consommation des data centers .....</b>	<b>74</b>
2.1. L'empreinte des data centers en quelques chiffres.....	74
2.2. Le progrès technologique au service de l'optimisation énergétique des data centers .....	75
2.3. Alimenter les data centers en énergie renouvelable, une fausse bonne idée ? ...	82
2.4. Conclusion.....	83
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>85</b>

## Résumé

Avec un double phénomène d'augmentation du nombre des internautes et d'explosion des usages mobiles, le secteur numérique vit un âge d'or qui se traduit dans les faits par une croissance exponentielle du nombre d'équipements connectés à internet et par une explosion du trafic IP dans les réseaux télécoms et les data centers.

Cette révolution n'est cependant pas sans conséquence sur la consommation énergétique du numérique, qui croît elle aussi à un rythme soutenu.

Ainsi, selon le Shift Project, en seulement cinq ans, entre 2013 et 2017, la consommation globale du numérique a augmenté de 50 %, passant de 2 000 à 3 000 TWh par an. À titre de comparaison, sur cette même période, la consommation électrique mondiale a crû d'un peu moins de 10 % et atteignait 21 500 TWh en 2017. D'ici 2025, la consommation énergétique du numérique devrait continuer à croître à un rythme annuel de 10 % et pourrait se situer entre 5 700 et 7 300 TWh en 2025.

Si la croissance de la consommation du numérique est portée par l'ensemble de ses segments – équipements terminaux, réseaux télécoms, data centers et production desdits équipements et infrastructures –, la production a été ces dernières années et restera à horizon 2025 le principal poste de consommation du numérique : elle représente 45 % de la consommation totale du secteur et cette part devrait rester aux alentours de 40 % d'ici 2025. La croissance énergétique du numérique est particulièrement forte comparée à la croissance de la consommation énergétique mondiale tous secteurs confondus : en 2017, le numérique représente environ 2,7 % de la consommation globale d'énergie finale au niveau mondial et devrait en représenter en 2025 entre 4,7 % et 6 %, soit un quasiment doublement par rapport à 2017. La traduction de cette consommation d'énergie en émissions de gaz à effet de serre est elle aussi inquiétante : le numérique représente 3,4 % des émissions totales de GES en 2017 soit 1,8 GtCO<sub>2e</sub> et devrait représenter 7,6 % en 2025 soit 3,7 GtCO<sub>2e</sub>.

Deux technologies émergentes suscitent par ailleurs de fortes craintes en termes énergétiques : les crypto-monnaies et l'internet des objets.

Les crypto-monnaies reposant sur des blockchains publiques constituent bien un moteur de la croissance de la consommation énergétique du numérique, mais représentent à ce jour une part encore faible de la consommation totale : entre 60 et 200 TWh en 2018. Cette consommation est cependant souvent perçue comme « non efficace » au regard de l'utilité sociale actuelle des crypto-monnaies et pourrait être drastiquement réduite si les systèmes de preuve de participation étaient privilégiés.

La consommation énergétique de l'internet des objets est encore peu étudiée. On sait cependant que les équipements IoT sont ceux dont la consommation devrait croître le plus à horizon 2030. Cette croissance devrait être essentiellement portée par la consommation des

dizaines de milliards d'objets attendus, tandis que la consommation supplémentaire qu'ils induisent en amont dans les réseaux télécoms et les data centers devrait rester faible. La consommation liée à la production, qui risque d'être élevée, n'est à ce stade pas documentée. Au final, l'adjonction d'une fonction de connexion à une multitude d'objets devrait avoir une incidence sur l'évolution de la consommation globale du numérique et la consommation de ce nouveau segment du numérique devrait, dès lors, être étudiée.

Face à ces enjeux, la réponse traditionnelle aux problèmes liés à la consommation énergétique croissante du numérique a reposé et repose encore essentiellement sur les gains énergétiques liés au progrès technologique. Le progrès technologique dans les grandes infrastructures numériques – réseaux télécoms et data centers – permet de réels gains énergétiques unitaires : par exemple, concernant les réseaux d'accès fixe, les réseaux en fibre optique PON consomment entre 0,2 et 0,8 W/utilisateur contre 3 et 5W/utilisateur pour les réseaux cuivre VDSL. Néanmoins, les inefficacités qui perdurent dans la gestion des infrastructures (notamment l'existence en parallèle de plusieurs générations de réseaux télécoms et la non-optimisation du taux d'utilisation des équipements dans les data centers) et surtout l'accroissement des usages et *in fine* du trafic internet, ne permettent pas de maîtriser la consommation globale. Par ailleurs, ce levier n'agit pas sur la consommation énergétique liée à la production des équipements et laisse donc de côté un poste majeur de la consommation du numérique.

Ce document de travail, deuxième d'une série de trois documents<sup>1</sup>, s'appuie sur les travaux présentés lors d'un cycle de séminaires sur l'impact environnemental du numérique qui s'est tenu à France Stratégie en 2018-2019.

Ce rapport a été rédigé avant la crise sanitaire. Les impacts de la crise sur nos usages numériques et sur l'empreinte énergétique du numérique ne sont donc pas abordés ici.

**Mots clés** : numérique, consommation électrique, data centers, impact environnemental, progrès technologique

---

<sup>1</sup> Dedryver L. et Couric V. (2020), « [La consommation de métaux du numérique : un secteur loin d'être dématérialisé](#) », *Document de travail*, n° 2020-05, France Stratégie, juin.

# Chapitre 1

## Accélération de la numérisation de nos sociétés

La numérisation croissante du monde, comme de la société française, détermine largement les enjeux et les défis relatifs à l'évolution de la consommation en énergie et en métaux du secteur numérique.

Il convient dès lors, en premier lieu, de se pencher sur l'évolution des comportements numériques des utilisateurs et les changements qu'ils induisent quant aux équipements et infrastructures du numérique. Cet état des lieux permet de constater qu'un double phénomène guide l'évolution de la numérisation en France comme dans le monde. D'un côté, son intensification évidente au vu des chiffres, avec toutes les conséquences induites en matière de production de données. De l'autre, son adaptation à des sociétés plus fluides et des individus plus nomades, dont témoigne un recours toujours plus important au téléphone portable.

### 1. Des changements comportementaux...

#### 1.1. Tendances constatées sur le marché français

Le *baromètre du numérique*<sup>2</sup> permet de suivre la diffusion des outils numériques et l'évolution de leur utilisation dans la société française.

##### 1.1.1. Des Français de plus en plus connectés à internet

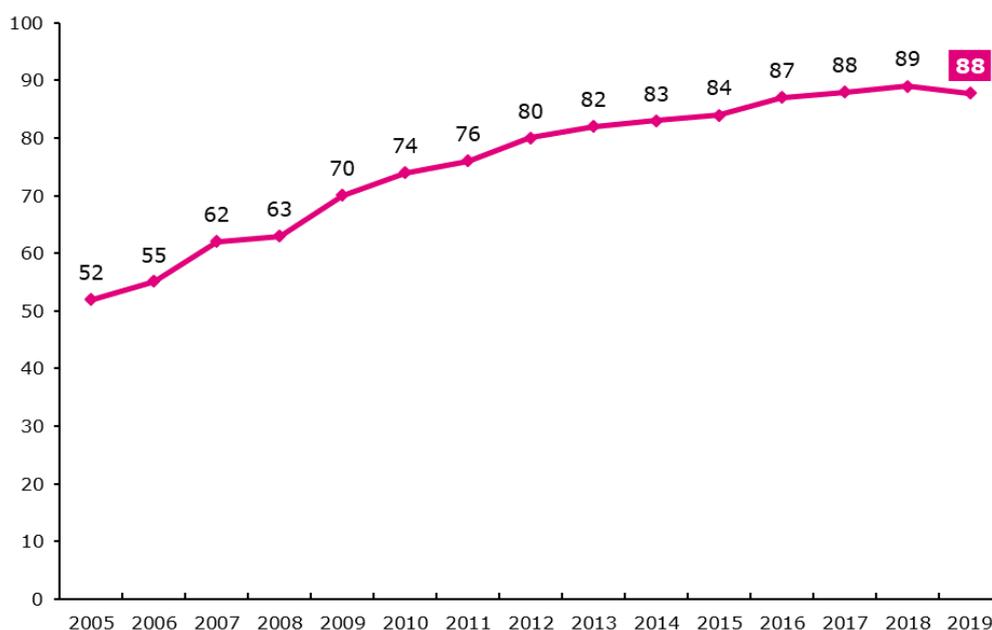
La numérisation de la société française se poursuit à un rythme rapide et soutenu depuis près de quinze ans (Graphique 1). Ainsi, entre 2005 et 2019, la proportion d'utilisateurs d'internet est passée de 52 % à 88 %. Près de 9 Français sur 10 disposent par ailleurs d'un accès à internet, quel qu'en soit le vecteur.

Plus révélateur encore de l'omniprésence d'internet dans nos vies, en 2019, près de 80 % de la population française se connecte quotidiennement à internet ; en moyenne, les internautes français y consacrent 21 heures par semaine, soit plus d'un sixième de leur temps hebdomadaire éveillé.

---

<sup>2</sup> Enquête annuelle réalisée depuis 2000 par le CREDOC à la demande de l'Arcep, du Conseil général de l'économie et de l'Agence du numérique.

**Graphique 1 – Proportion de personnes se connectant à internet**

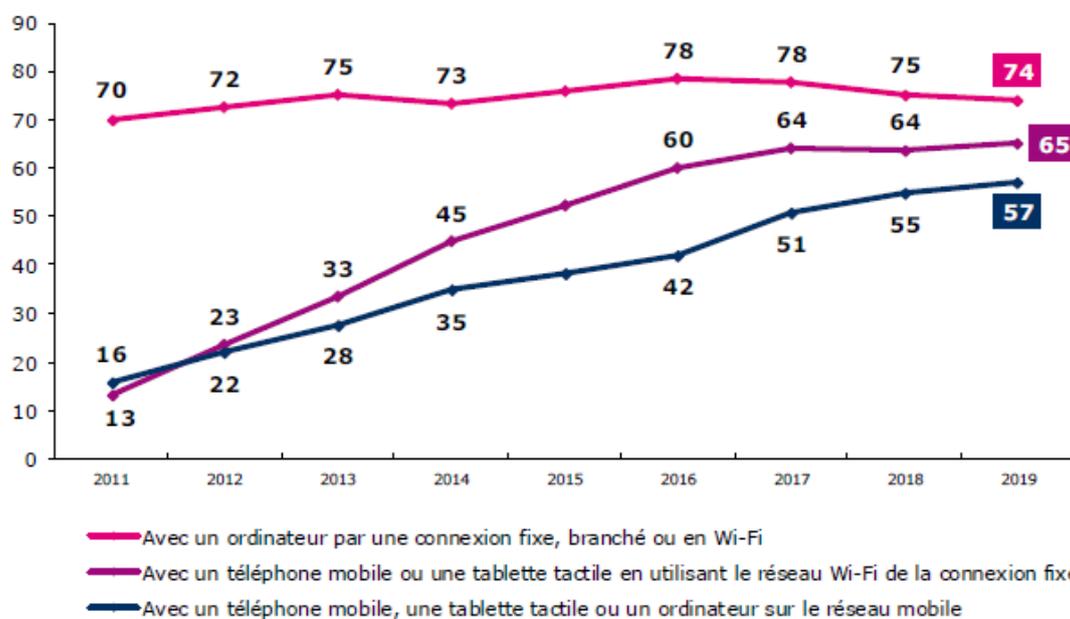


Champ : ensemble de la population de 12 ans et plus, en pourcentage.

Source : Baromètre du numérique, 2019 (CREDOC, Enquêtes sur les « Conditions de vie et les Aspirations »)

### 1.1.2. Une croissance portée par l'essor de la connexion en mobilité

**Graphique 2 – Les différents modes de connexion à internet à domicile**



Champ : ensemble de la population de 12 ans et plus, en pourcentage.

Source : Baromètre du numérique, 2019 (CREDOC, Enquêtes sur les « Conditions de vie et les Aspirations »)

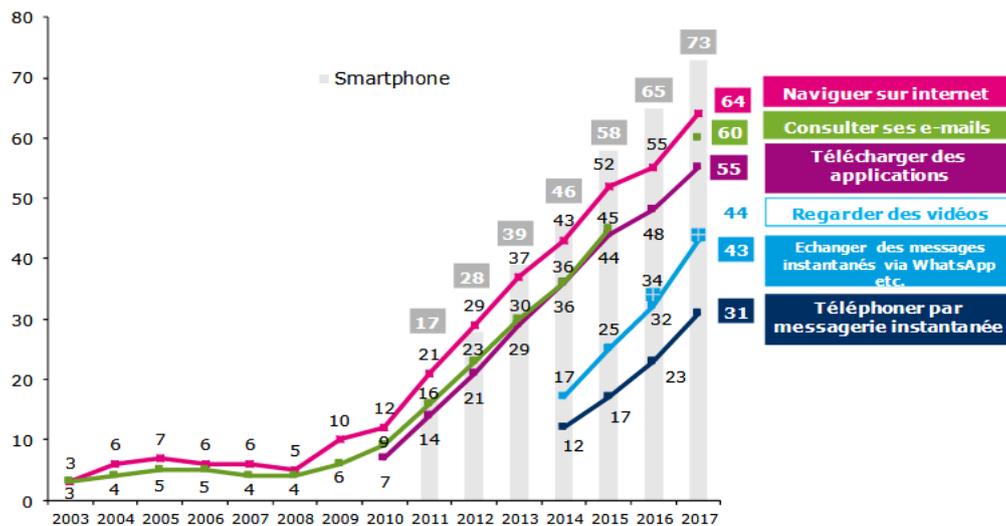
Cette croissance du nombre d'internautes et de la fréquence de leur utilisation d'internet est notamment due à l'essor fulgurant des smartphones et des usages mobiles en France. Bien que restant le principal mode de connexion à internet, la connexion par ordinateur décline depuis 2016, preuve d'une mutation des pratiques.

La connexion sur le réseau mobile, de plus en plus plébiscitée par les usagers, est désormais le seul mode de connexion dont la progression est ininterrompue : elle atteint désormais plus de la moitié de la population (Graphique 2).

Pour le CREDOC, « la démocratisation du réseau 4G sur le territoire national joue un rôle dans l'accroissement des connexions mobiles. Ainsi, 77 % des utilisateurs de 4G se connectent [en 2018] à internet à domicile via le réseau mobile (contre 70 % en 2016) ».

Cette progression du mode de connexion mobile se retrouve également dans la quantité de données consommées mensuellement par les abonnés mobiles. Dans son observatoire, l'Arcep relève ainsi qu'au deuxième trimestre 2020 la consommation de données mobiles était en moyenne de 7,8 Go/mois et par carte SIM (contre 5,8 Go au T2 2019) et de 10,2 Go/mois pour les utilisateurs de réseaux 4G (8,3 au T2 2019)<sup>3</sup>.

**Graphique 3 – Proportion de personnes utilisant un téléphone mobile pour...**



Champ : ensemble de la population de 12 ans et plus, en pourcentage.

Source : Baromètre du numérique, 2017 (CREDOC, Enquêtes sur les « Conditions de vie et les Aspirations »)

Comme illustré dans le graphique 3, la progression du trafic mobile est portée par une diversité croissante d'usages : navigation sur internet, consultation des e-mails ou téléchargement d'applications, mais aussi par de nouveaux usages tels que la messagerie instantanée (déclin du SMS au profit d'applications s'appuyant sur une connexion à internet comme *Whatsapp*) ou la vidéo.

<sup>3</sup> Arcep, *Observatoire des marchés des communications électroniques en France*, deuxième trimestre 2020.

## 1.2. Les dynamiques françaises s'inscrivent dans des tendances mondiales similaires

Cette évolution des comportements se constate également au niveau mondial, où l'on observe deux tendances similaires d'augmentation du nombre d'internautes et d'explosion des usages mobiles. Au début des années 2010, le nombre d'internautes dans le monde progresse à un rythme de 20 % par an en moyenne et entre 40 % à 50 % par an pour les pays en développement, qui vivent une phase de rattrapage accéléré.

Sous l'effet de cette croissance, la population mondiale vient de passer le cap symbolique des 50 % d'internautes. Ainsi, selon l'Union internationale des télécommunications (UIT), 51,2 % de la population, soit 3,9 milliards d'individus, dispose d'une connexion internet à la fin de l'année 2018<sup>4</sup>. Il existe cependant une évidente dichotomie entre les pays développés d'une part, où un certain degré de saturation est atteint avec les 4/5<sup>e</sup> de la population connectée, et les pays en développement, d'autre part, où seuls 45 % de la population sont connectés. Il reste donc de grandes marges de progression dans ces régions.

Le taux de pénétration de l'internet mobile, qui alimente cette croissance, est ainsi passé selon l'UIT de 4 souscriptions pour 100 habitants en 2007 à 70 souscriptions pour 100 habitants en 2018. Cette nette progression de l'internet mobile s'explique par la couverture quasi complète de la planète par des réseaux 3G, et de plus en plus 4G<sup>5</sup>, ainsi que par la démocratisation d'offres mobiles aux tarifs abordables. Par ailleurs, si moins de la moitié des foyers dans le monde disposent d'un ordinateur personnel, les trois quarts de la population mondiale possèdent un téléphone portable. Pour autant, ce taux chute à 56 % dans les pays les moins développés.

## 1.3. Croissance en corollaire du nombre d'équipements connectés à internet

La société Cisco estime que le nombre d'équipements connectés à internet (incluant les équipements traditionnels tels que les ordinateurs, tablettes et téléphones, mais aussi les nouveaux équipements de l'internet des objets) devrait passer de 18,4 milliards en 2018 à 29,3 milliards en 2023<sup>6</sup>.

**Tableau 1 – Estimation (2018) et projection (2023)  
du nombre d'équipements moyen connectés par personne**

	2018	2023
Asie Pacifique	2,1	3,1
Europe centrale et de l'Est	2,5	4,0
Amérique latine	2,2	3,1
Moyen Orient et Afrique	1,1	1,5
Amérique du Nord	8,2	13,4
Europe de l'Ouest	5,4	9,4
<b>Total</b>	<b>2,4</b>	<b>3,6</b>

Source : Cisco, VNI, 2018-2023

<sup>4</sup> UIT, *Measuring the Information Society Report*, 2018.

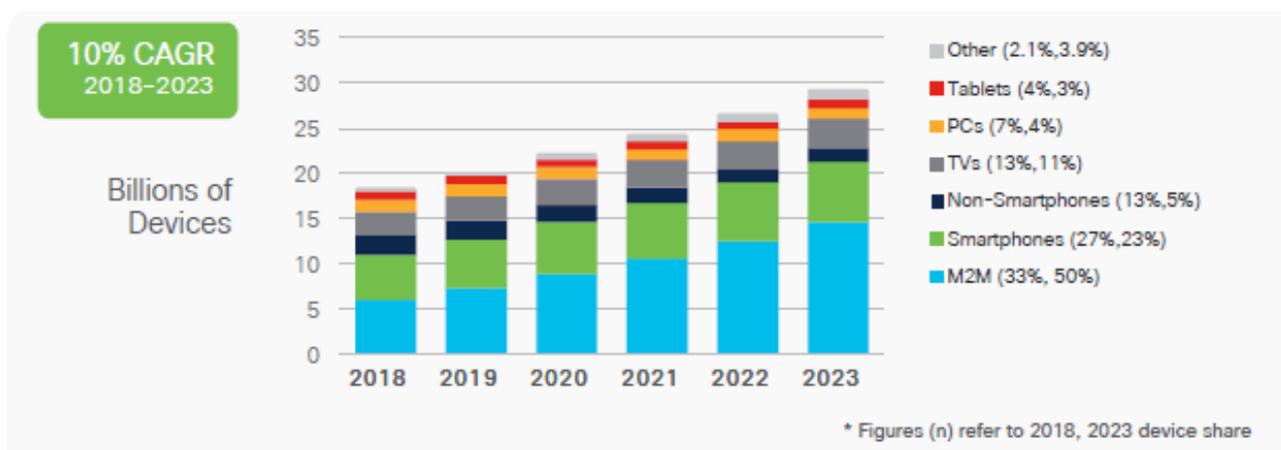
<sup>5</sup> Alors que les réseaux fixes à très haut débit peinent à se déployer dans les pays les moins développés.

<sup>6</sup> Cisco *Visual Networking Index : forecast and trends*, 2018-2023.

Ainsi, en moyenne, le nombre d'équipements par personne devrait croître de 2,4 à 3,6 sur la même période. En pratique, ces chiffres agrégés cachent une tendance principalement portée par les pays développés, tandis que la croissance sera vraisemblablement plus lente dans les pays en développement.

L'Amérique du Nord et l'Europe de l'Ouest sont les principaux utilisateurs d'équipements connectés à internet avec respectivement 8,2 et 5,4 équipements par personne en 2018 et, selon Cisco, 13,4 et 9,4 équipements par personne dès 2023 (Tableau 1). Le Moyen Orient et l'Afrique restent à ce jour drastiquement moins équipés, avec seulement 1,1 équipement par personne en 2018 et 1,5 en 2023.

**Graphique 4 – Nombre de connexions selon le type d'équipement**



Source : Cisco VNI Global IP Traffic Forecast, 2018-2023

Le graphique 4 montre que ce sont les objets connectés (faisant partie du segment M2M pour machine à machine) qui, avec l'essor de l'internet des objets<sup>7</sup>, devraient alimenter la croissance du nombre d'accès dans les prochaines années.

## 2. ... à l'origine d'une explosion du trafic IP et dans les data centers

Ces deux tendances sont à l'origine d'une augmentation exponentielle au niveau mondial du trafic sur internet et dans les data centers<sup>8</sup>, qui devrait se poursuivre dans les prochaines années.

<sup>7</sup> L'expression *Internet des objets* désigne un ensemble de concepts, d'entités réseau, d'architecture de communication et de services permettant la connexion de l'espace physique à l'espace numérique. Cet ensemble forme un système connecté et interdépendant. Voir le MOOC de l'Institut des Mines-Télécom.

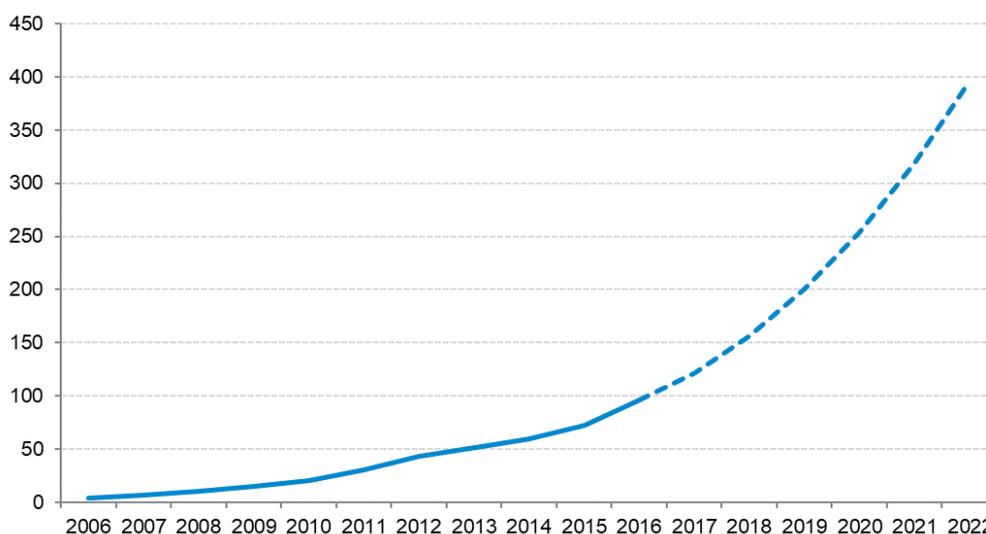
<sup>8</sup> Pour une définition des data centers, du cloud computing et de la distinction entre cloud public et cloud privé, voir notamment le [Guide sur le cloud computing et les data centers à l'intention des collectivités locales](#) publié en juillet 2015 par la DGE, la Caisse des dépôts et le CGET.

## 2.1. Les évolutions du trafic IP mondial

### 2.1.1. L'explosion du trafic IP<sup>9</sup>

La société Cisco publie tous les ans<sup>10</sup> des données sur la croissance du trafic mondial sur internet. Selon ces publications, **le trafic annuel sur internet en 2017 est de 1,5 Zettaoctet (Zo), et devrait approcher les 4,8 Zo par an en 2022.** Globalement, Cisco estime que le trafic IP sur Internet s'intensifiera à un taux de croissance annuel moyen de 26 % entre 2017 et 2022.

**Graphique 5 – Évolution du trafic IP mondial mensuel (en exaoctets)**



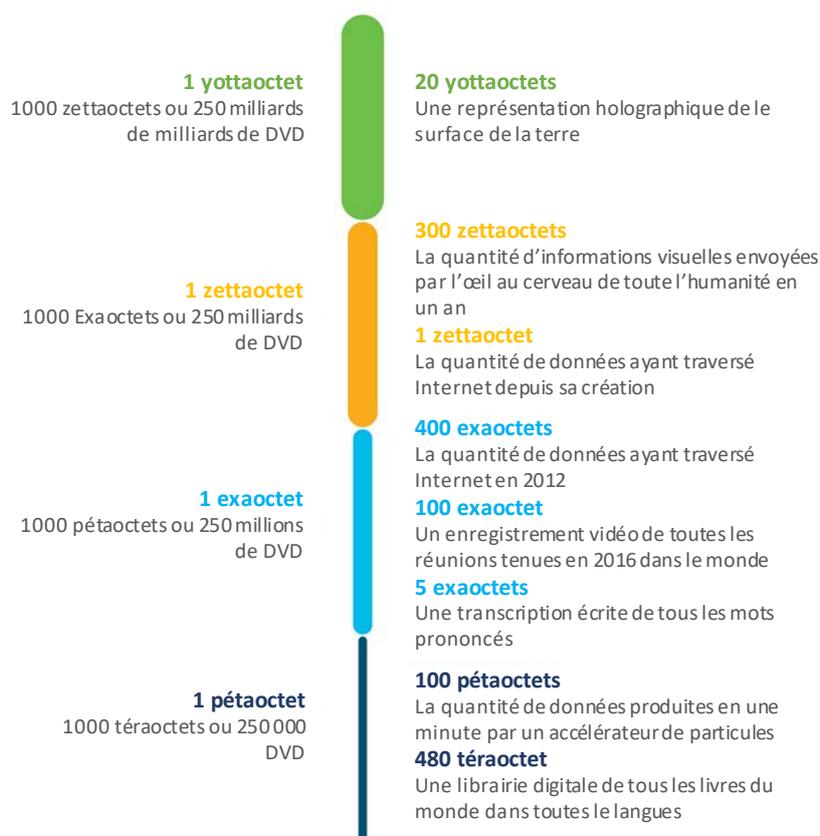
Légende : trait plein : estimation de l'évolution du trafic ; trait pointillé : projection de l'évolution du trafic.

Source : France Stratégie (données : Cisco Visual Networking Index)

<sup>9</sup> Cisco Visual Networking Index: forecast and trends, 2017-2022, Appendix C et D. À la différence du trafic internet qui ne prend en compte que les connexions impliquant au moins deux réseaux de fournisseur, le trafic IP rend compte de l'intégralité de l'utilisation d'internet. Pour autant, la majorité du trafic IP correspond au trafic internet.

<sup>10</sup> Cisco Visual Networking Index : forecast and trends, 2017-2022.

Figure 1 – L'échelle de l'unité octet



Source : Cisco Visual Networking Index, 2017

Depuis 2016, internet est entré dans « l'ère du zettaoctet ». Pour mieux comprendre la quantité de données en jeu, la figure 1 proposée par Cisco permet de se rendre compte des échelles en présence.

### 2.1.2. Le mobile représente une part croissante du trafic mondial

Lorsqu'on parle de connectivité mobile, il convient tout d'abord de distinguer deux notions : le trafic transitant par des réseaux mobiles, par exemple les réseaux 3G, 4G et demain 5G (ci-après, « trafic mobile »), du trafic généré par des équipements mobiles et qui peut certes transiter par des réseaux mobiles, mais également par des réseaux fixes via des connexions Wi-Fi par exemple (ci-après, « trafic généré par des équipements mobiles »).

#### Trafic mobile

Actuellement, le trafic mobile ne représente qu'environ 140 exaoctets par an dans le monde, soit 9 % du trafic IP global. Mais, avec un taux de croissance annuel moyen attendu de 46 % sur la période 2017-2022, la part du trafic mobile est en pleine croissance. Cisco estime qu'en **2022 le trafic mobile atteindra quasiment 1 zettaoctet par an et représentera 20 % du**

**trafic IP global.** L'internet mobile devrait donc entrer dans l'ère du zettaoctet six ans après l'internet global<sup>11</sup>.

**Tableau 2 – Estimation (en 2017) et projections (à partir de 2018) d'évolution du trafic mobile par zones géographiques, en exaoctets par mois**

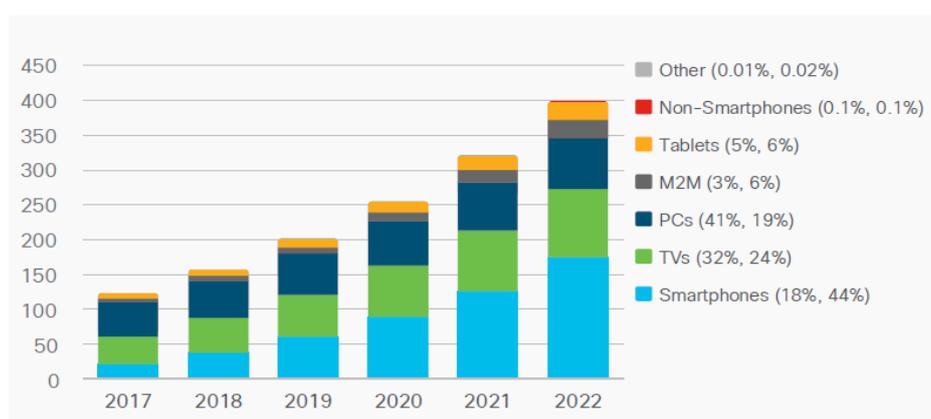
	2017	2018	2019	2020	2021	2022	Taux de croissance annuel moyen (2017-2022)
<b>Asie Pacifique</b>	5,88	10,35	15,91	22,81	31,81	43,17	49 %
<b>Moyen Orient et Afrique</b>	1,22	2,05	3,25	5,01	7,56	11,17	56 %
<b>Europe centrale et de l'Est</b>	1,38	2,15	3,12	4,32	5,83	7,75	41 %
<b>Amérique du Nord</b>	1,26	1,8	2,50	3,41	4,48	5,85	36 %
<b>Europe de l'Ouest</b>	1,02	1,47	2,06	2,81	3,80	5,12	38 %
<b>Amérique latine</b>	0,75	1,18	1,72	2,42	3,31	4,44	43 %
<b>Total</b>	11,51	19,01	28,56	40,77	56,80	77,49	46 %

Source : Cisco VNI, 2018

Bien que généralisée à l'ensemble des continents, l'explosion la plus forte du trafic mobile devrait être constatée au Moyen Orient et en Afrique avec un taux de croissance annuel moyen de 56 % sur la période 2017-2022 (Tableau 2).

### Trafic généré par des équipements mobiles

**Graphique 6 – Trafic IP global par types d'équipements, en exaoctets par mois, 2017-2022**



Source : Cisco, VNI Global IP Traffic Forecast, 2017-2022

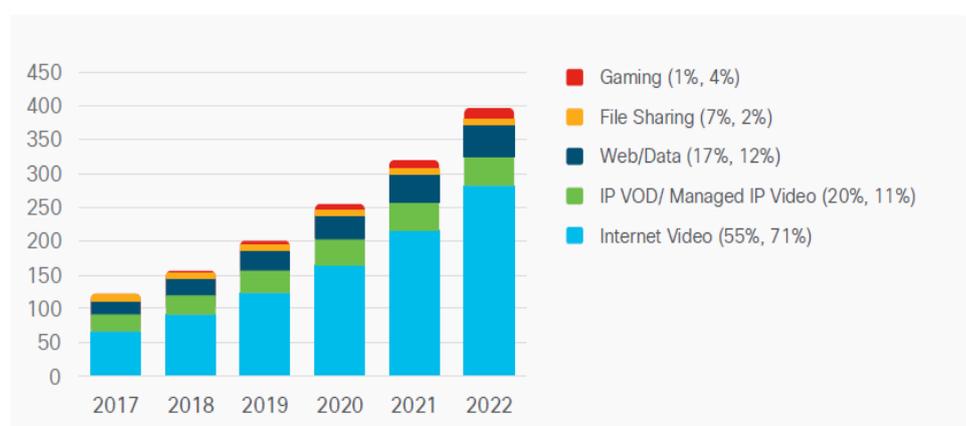
<sup>11</sup> Le trafic IP global a passé la barre du zettaoctet en 2016 selon Cisco.

Comme illustré par le graphique 6, la montée en puissance du mobile se constate aussi à partir du terminal à l'origine de la connexion à internet. Selon Cisco, alors que les PC génèrent encore 41 % du trafic IP global en 2017, cette part devrait continuer à décroître pour atteindre 19 % en 2022. La tendance sera probablement inverse concernant les smartphones, qui devraient générer 44 % du trafic IP global en 2022 (pour 18 % en 2017). Sur la période 2017-2022, le smartphone a de bonnes chances de détrôner le PC comme principale source de trafic sur internet.

### 2.1.3. La vidéo au cœur de la croissance du trafic IP global

#### Part de la vidéo dans le trafic IP mondial

Graphique 7 – Trafic IP global par catégorie d'applications en exaoctets par mois, 2017-2022



Source : Cisco VNI Global IP Traffic Forecast, 2017-2022

La vidéo est depuis plusieurs années le service qui génère le plus de trafic IP sur internet. Elle représente déjà 75 % du trafic total en 2017<sup>12</sup> et sa part devrait continuer à croître pour atteindre 82 % en 2022 selon Cisco<sup>13</sup> (Graphique 7).

#### Part de la vidéo dans le trafic mobile

Tableau 3 – Trafic global des données mobiles en exaoctets par mois, 2017-2022

	Observé	Prévu					Taux de croissance annuel moyen 2017-2022
	2017	2018	2019	2020	2021	2022	
Vidéo	6,82	12,05	19,28	29,15	42,73	60,89	55 %
Non-vidéo	4,69	6,96	9,28	11,62	14,06	16,06	29 %

Source : Cisco Mobile VNI, 2019

<sup>12</sup> Incluant « vidéos sur internet, vidéo à la demande, fichiers vidéo échangés, retransmission de jeux vidéo, et vidéo en direct » selon la définition retenue par Cisco.

<sup>13</sup> *Ibid.*

Le tableau 3 confirme que cette tendance générale se retrouve également sur le segment mobile. La vidéo qui représente déjà 59 % du trafic mobile en 2017, devrait continuer à progresser pour atteindre 79 % en 2022. Avec un taux de croissance annuel moyen de 55 % sur la période 2017-2022 (contre 29 % pour les applications non vidéo), la vidéo confirme son statut de principal moteur de la croissance du trafic mobile.

### Part de la vidéo dans le trafic généré par les principales applications<sup>14</sup>

Figure 2 – Partage du trafic mondial des applications



Note de lecture : pour chaque application, la flèche descendante indique la part du trafic internet descendant (ou *downstream* en anglais) généré par l'application et la flèche montante indique la part du trafic internet montant (ou *upstream* en anglais) généré par l'application. Netflix génère donc 14,97% du trafic descendant et 2,92% du trafic montant sur internet.

Source : Sandvine, *The Global Internet Report*, octobre 2018

La vidéo occupe également une part prépondérante dans le trafic généré par les applications. Une étude publiée par Sandvine est à ce titre éloquent : sur les dix premières applications génératrices de trafic internet dans le monde, cinq relèvent de la consultation de vidéos, dont les quatre premières du classement (Figure 2). Avec presque 15 % du trafic internet mondial descendant, Netflix à lui seul suffit à rendre compte de la place décisive de la vidéo.

La croissance du trafic vidéo global s'explique notamment par deux tendances actuelles de consommation : le déclin de la télévision linéaire, témoignant d'un besoin d'individualisation de l'offre des programmes vidéo, et l'essor de la haute définition.

### Impacts du déclin de la TV linéaire

La croissance de la part de la vidéo dans le trafic IP global et mobile s'explique premièrement par le déclin de la télévision linéaire. Le passage d'un nombre croissant d'utilisateurs de la télévision linéaire à la télévision sur internet entraîne un accroissement du trafic IP lié à la perte du mode de diffusion multicast ou multidestinataire. Cisco estime que le passage au mode de diffusion unicast génère en moyenne un trafic plus élevé de 72 % par foyer<sup>15</sup>.

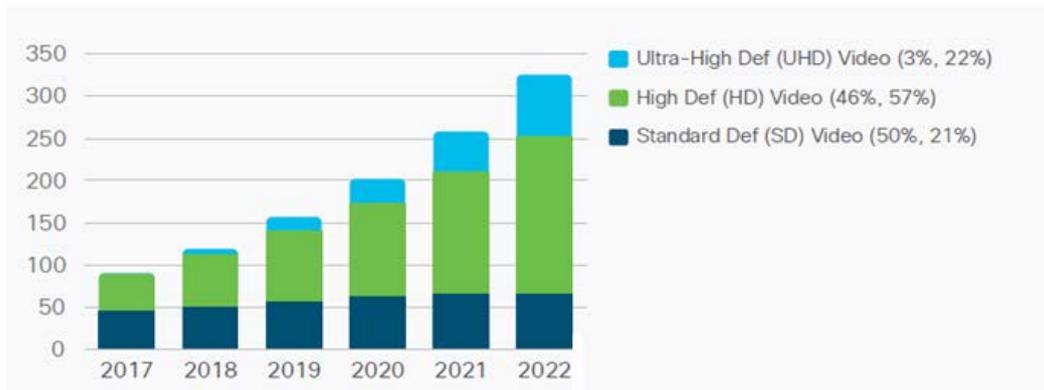
<sup>14</sup> Trafic généré sur les réseaux fixes et mobiles confondus.

<sup>15</sup> Cisco prévoit en effet que : « Du point de vue du trafic, [...] en moyenne, un ménage disposant toujours d'une télévision traditionnelle générera moins de trafic qu'un ménage qui aura coupé le cordon et se reposant

### Essor de la haute définition

La croissance de la part de la vidéo dans le trafic IP global et mobile s'explique deuxièmement par l'essor des formats vidéo de haute résolution, très consommateurs en bande passante. Ainsi, alors que les formats standards (ou SD) requièrent des débits de 2Mbps pour un visionnage fluide, les formats en haute définition (ou HD) nécessitent entre 5 et 7,2 Mbps et les formats en ultra haute définition (ou UHD) entre 15 et 18 Mbps.

**Graphique 8 – Répartition de la consommation en vidéos selon leur résolution en exaotets par mois**



Lecture : ce graphique montre l'évolution de la part de chaque format vidéo dans la consommation totale mensuelle de la vidéo. Le format standard dit SD voit ainsi sa part diminuer drastiquement sur la période 2017-2022, passant de 50 % à 21 %.

Source : Cisco VNI, 2018

Avec l'adoption croissante de ces formats à haute résolution illustrée par le graphique 8, Cisco estime qu'en 2022 les vidéos UHD pourraient représenter 22 % du trafic global IP vidéo et jusqu'à 35 % du trafic IP de vidéo à la demande.

## 2.2. Une sollicitation accrue des data centers

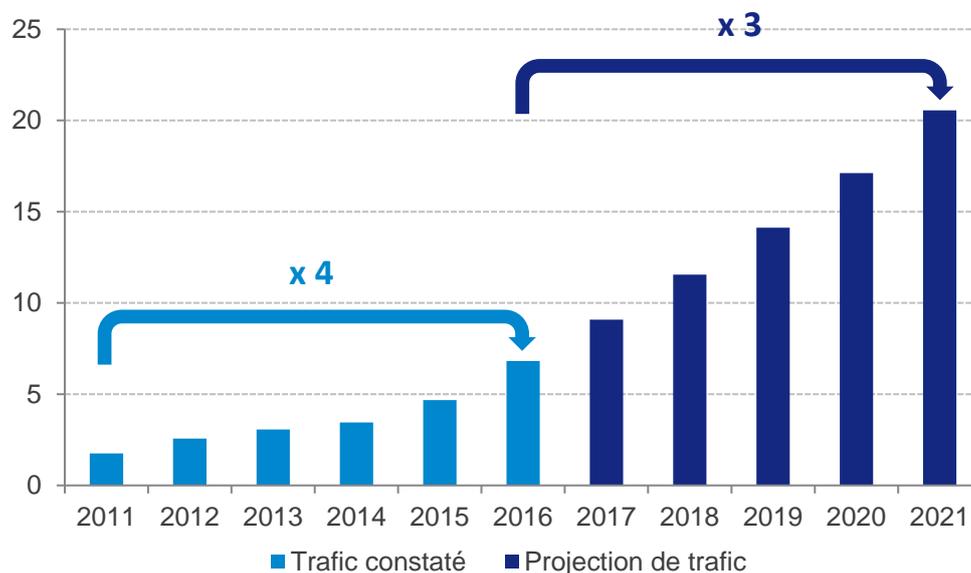
La sollicitation croissante des infrastructures data centers est perceptible à travers l'étude complémentaire du trafic global des data centers et des volumes de données stockés en leur sein.

---

uniquement sur la vidéo issue d'Internet. Ce dernier ménage génère 141 GB par mois en 2017, contre 82 pour le premier » [en anglais dans le texte].

### 2.2.1. Explosion du trafic global des data centers (flux)

Graphique 9 – Évolution du trafic global des data centers (en zettaoctets)



Source : France Stratégie (données Cisco, Global Cloud Index)

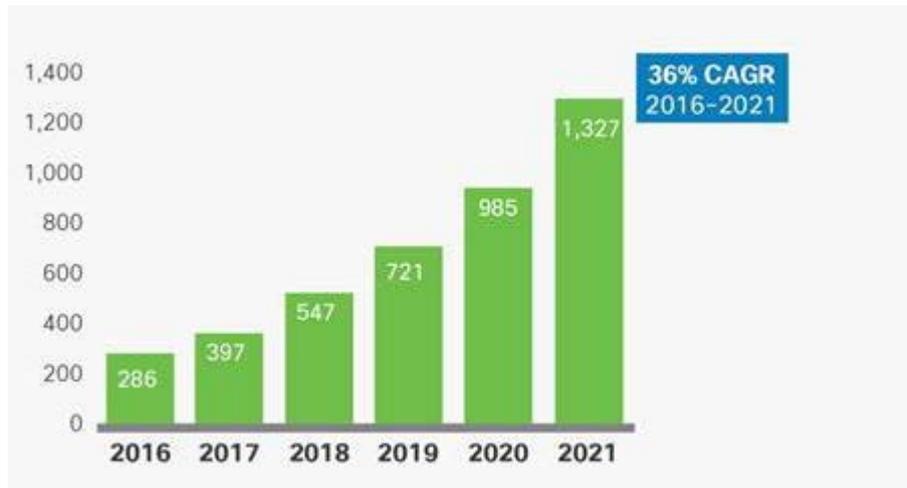
Entre 2011 et 2016, le trafic global annuel des data centers<sup>16</sup> a presque été multiplié par 4, passant de 1,8 zettaoctet à 6,8 zettaoctets. Cisco anticipe une multiplication par 3 du trafic global des data centers sur les cinq prochaines années, pour culminer à 20,6 zettaoctets en 2021 (graphique 9).

### 2.2.2. Croissance des volumes de données stockées dans les data centers

La croissance du trafic global des data centers est notamment la conséquence de la croissance du volume de données stockées en leur sein.

<sup>16</sup> Incluant, pour une large part, le trafic interne aux data centers (le trafic ne traversant ni internet, ni les réseaux IP WAN).

**Graphique 10 – Volume de données stockées dans des data centers en exaoctets (estimation en 2016, projection jusqu'en 2021)**



Note de lecture : en 2016, le volume de données stockées dans les data centers était de 286 exaoctets. Entre 2016 et 2021, le volume de données stockées devrait progresser à un taux de croissance annuel moyen de 36 % pour atteindre 1,3 zettaoctet.

Source : Cisco Global Cloud Index, 2016-2021

Pour accompagner cette croissance, la capacité de stockage des data centers dans le monde devrait évoluer de 663 exaoctets à 2,6 zettaoctets, soit une multiplication par 4 de la capacité disponible entre 2016 et 2021.

**Graphique 11 – Évolution des pratiques de stockage de données sur la période 2016-2021**

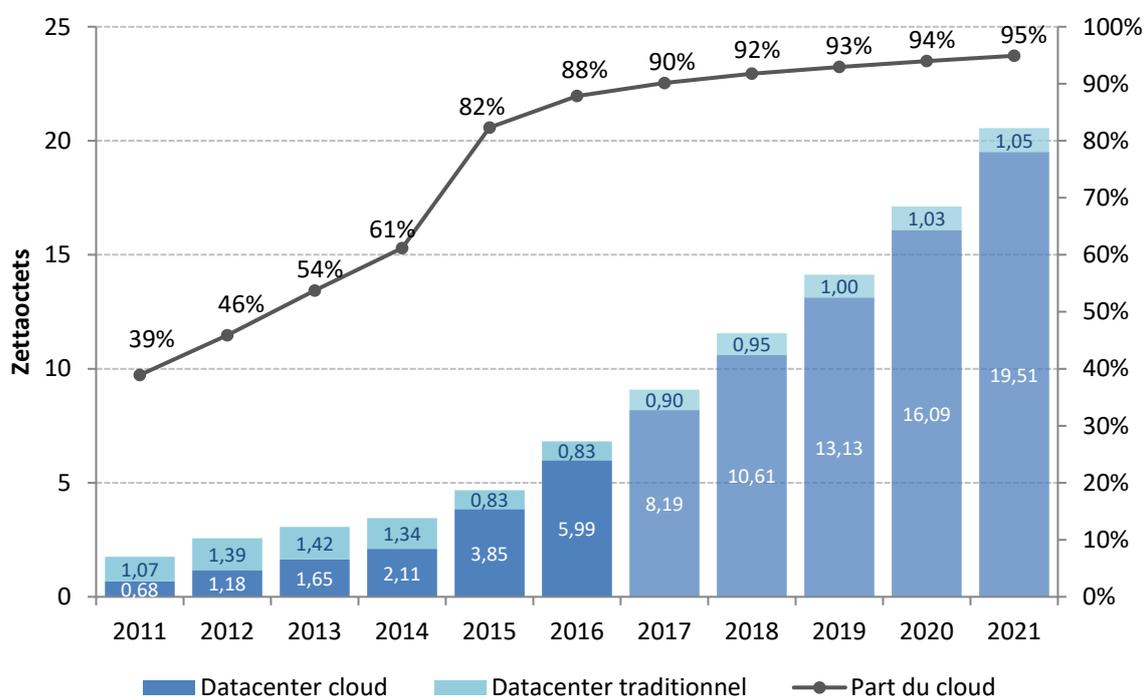


Source : Cisco Global Cloud Index, 2016-2021

Il convient cependant de relativiser la part des data centers dans le stockage des données. En effet, ce chiffre reste relativement faible si on le compare au volume de données qui restent stockées dans les équipements eux-mêmes. Selon Cisco, ce dernier devrait atteindre 5,9 zettaoctets en 2021 (Graphique 11).

### 2.2.3. Des évolutions portées par l'essor des data centers cloud

Graphique 12 – Évolution de la part du cloud dans le trafic global des data centers



Note de lecture : l'histogramme représente l'évolution du trafic dans les data centers traditionnels et les data centers cloud en zettaoctets (ordonnée principale), et la courbe représente l'évolution de la part du cloud dans le trafic total des data centers en pourcentage (ordonnée secondaire).

Source : France Stratégie (données Cisco, Global Cloud Index)

Le graphique 12 montre que depuis 2011 la croissance du trafic global des data centers est presque exclusivement portée par l'essor du cloud. Entre 2011 et 2016, le trafic des data centers cloud est ainsi passé de moins de 1 à 6 zettaoctets. D'ici 2021, Cisco estime que cette croissance devrait se poursuivre pour atteindre près de 20 zettaoctets, soit plus de 95 % du trafic des data centers dans le monde.

Nous verrons dans le chapitre 3 que cette montée en puissance du cloud n'est pas sans influence sur la dynamique de consommation énergétique du segment des data centers.

## Chapitre 2

# Comprendre l'évolution de la consommation énergétique du numérique

### 1. Quel bilan de la consommation énergétique du numérique ?

Évaluer la consommation énergétique du numérique nécessite au préalable de connaître les différentes infrastructures et équipements sur lesquelles le numérique repose. Ces infrastructures et équipements sont traditionnellement classés en trois familles.

- Les **data centers** ou centres de données sont des infrastructures immobilières sécurisées hébergeant des équipements informatiques nécessaires au stockage, au traitement et à la protection des données numériques. Un centre de données est composé :
  - d'équipements informatiques comprenant les serveurs, les systèmes de stockage, les équipements réseaux (commutateurs de réseau, routeurs, répartiteurs, pare-feu), ainsi que les câbles et racks physiques permettant d'organiser et d'interconnecter ces équipements ;
  - d'infrastructures techniques nécessaires au support des opérations du data center comprenant les équipements permettant l'alimentation électrique et le refroidissement des serveurs, ainsi que les points d'accès aux réseaux de télécommunications à très haut débit et aux réseaux électriques à haute tension.

Les data centers dans le monde présentent des tailles très variables pouvant aller d'une salle de quelques mètres carrés à des bâtiments de plus de 10 000 m<sup>2</sup>.

- Les **réseaux de télécommunications** sur lesquels sont acheminées les informations. Ces réseaux, principalement déployés à l'échelle nationale par des opérateurs de communications électroniques (par exemple, Bouygues Telecom, Free, Orange et SFR en France), sont interconnectés notamment grâce à des câbles sous-marins pour former un maillage mondial. Ils reposent sur des technologies de communications fixes (réseaux xDSL, réseaux en câble coaxial et réseaux en fibre optique) et mobiles (réseaux 2G, 3G, 4G, réseaux dédiés à l'internet des objets et demain la 5G).
- Les **équipements terminaux** grâce auxquels les utilisateurs résidentiels et professionnels accèdent aux réseaux de télécommunications pour leurs propres besoins : ordinateurs, téléphones mobiles dont les smartphones, tablettes, TV connectées, consoles de jeux connectées, et demain une multitude d'objets connectés.

La consommation énergétique totale du numérique **en phase d'utilisation** représente la somme de la consommation énergétique de l'ensemble des data centers, réseaux de télécommunications et équipements terminaux dans le monde.

À cette consommation énergétique en phase d'utilisation s'ajoutent les consommations énergétiques nécessaires à l'extraction de matières premières composant les équipements numériques, ainsi qu'à la production, au transport et à la gestion de la fin de vie (notamment recyclage) de ces équipements. La consommation énergétique sur l'ensemble du cycle de vie d'un équipement, à l'exception de sa consommation en phase d'utilisation, est appelée **énergie grise**.

## 1.1. Comment sont construits les chiffres de la consommation du numérique

### 1.1.1. Des chiffres issus de modélisations

La consommation énergétique du numérique est un sujet d'étude relativement récent : les premières études scientifiques datent de la fin des années 2000. Depuis cette époque, si de nombreux chiffres circulent sur la consommation énergétique du numérique en France et dans le monde, ils sont loin d'être comparables.

Certains chiffres, liés à la consommation énergétique d'un acteur donné, sont issus de données constatées. C'est par exemple le cas de la consommation énergétique des data centers de Google<sup>17</sup> ou de celle des réseaux télécoms d'Orange<sup>18</sup>, qui sont publiées par ces acteurs dans le cadre de leur politique de transparence (et plus particulièrement dans le cadre de leur stratégie de RSE). Les données constatées ne peuvent cependant à elles seules permettre de dresser un bilan total de la consommation énergétique mondiale ou même nationale du numérique. En effet, tous les acteurs du numérique ne publient pas leur consommation énergétique annuelle et ceux qui le font publient des données agrégées, afin de protéger leur secret des affaires, qui ne sont pas nécessairement assez détaillées pour être exploitées correctement.

En pratique, les chiffres disponibles sur la consommation totale du numérique relèvent d'une logique complètement différente. Ces chiffres constituent des estimations obtenues à l'aide de modélisations.

Les bilans chiffrés de la consommation énergétique du numérique étant le résultat de modélisations, on peut constater des écarts très significatifs entre plusieurs études également sérieuses. Ces écarts peuvent s'expliquer tant par les choix en termes de périmètre du numérique que par les méthodes et hypothèses de modélisation retenues.

Les modélisations présentent souvent une partie bilan et une partie proposant des projections de la consommation future. Si le bilan de la consommation passée est indispensable pour dresser un état des lieux en établissant des ordres de grandeurs crédibles pour la consommation du numérique, les projections de la consommation future permettent d'alerter sur la dynamique de croissance du secteur.

---

<sup>17</sup> [Google Environmental Report](#), 2017.

<sup>18</sup> « [Bilan RSE 2017](#) », Orange.

### **Actualisation de la modélisation d'Andrae et Edler par le Shift Project**

En 2015, les chercheurs Andrae et Edler<sup>19</sup> proposent une modélisation qui aboutit à trois projections alternatives de la consommation du numérique jusqu'en 2030. Ces trois projections se fondent sur des hypothèses différentes tenant principalement à des variations de l'efficacité énergétique en phase usage des équipements et infrastructures, de la croissance du trafic sur internet, et enfin du parc d'équipements numériques :

- le meilleur cas (« best case » dans l'étude) : l'efficacité énergétique des équipements et infrastructures s'accroît rapidement et la croissance du trafic ralentit ;
- le cas attendu (« expected case » dans l'étude) : l'efficacité énergétique et la croissance du trafic suivent les tendances des années 2010-2013 ;
- le pire cas (« worst case » dans l'étude) : l'efficacité énergétique croît moins vite qu'entre 2010 et 2013 et la croissance du trafic s'accélère.

Il est intéressant de noter que le périmètre retenu dans cette étude diffère sensiblement de celui d'études précédentes. Les auteurs ont tout d'abord fait le choix d'y intégrer une large gamme d'équipements numériques tels que les téléphones mobiles, smartphones, tablettes, mais aussi les téléviseurs connectés, décodeurs TV, lecteurs DVD et consoles de jeux. Ce périmètre large reflète l'évolution des usages numériques.

Ils ne se sont, en outre, pas limités à l'étude de la consommation énergétique en phase usage, mais ont également intégré la consommation énergétique liée à la production des équipements et infrastructures mis sur le marché sur la période étudiée (à l'exclusion donc de la consommation liée au transport et au recyclage des équipements).

Dans une optique de prise en compte des impacts du numérique sur l'ensemble du cycle de vie, la modélisation d'Andrae et Edler qui inclut la consommation énergétique en phase de production devrait être privilégiée.

Si le travail de modélisation d'Andrae et Edler constitue une référence validée par la communauté scientifique, il présente toutefois une limite indéniable, qui tient à l'ancienneté des données utilisées. Leurs scénarios se fondent en effet sur l'état des données allant jusqu'en 2013, avec une marge d'erreur cumulée sur une vingtaine d'années quant à la croissance attendue.

En 2018, le Shift Project a proposé une mise à jour du modèle développé par Andrae et Edler en utilisant des données allant jusqu'en 2017. Cette mise à jour inclut une actualisation du scénario « attendu » d'Andrae et Edler et l'ajout de trois scénarios, dont un scénario volontariste de « sobriété » tablant sur un changement radical des pratiques de consommation. Ce dernier scénario ne représente donc pas l'évolution « naturelle » de la consommation énergétique du numérique si aucune politique publique de maîtrise des impacts n'est mise en œuvre.

---

<sup>19</sup> On global electricity usage of communication technology : trends to 2030, Anders S. G. Andrae et Thomas Edler, 30 avril 2015.

**Les trois scénarios non volontaristes représentent les tendances suivantes**

Le scénario « Expected updated », à l'image du scénario « Expected » d'Andrae et Edler, constitue un scénario de continuité des tendances constatées sur le gain d'efficacité et le taux de croissance du trafic : ce scénario du Shift Project fait l'hypothèse que l'efficacité énergétique continue d'évoluer conformément aux tendances constatées par Andrae et Edler entre 2010 et 2013 et actualise le taux de croissance du trafic sur la base des chiffres fournis par Cisco, en prolongeant les tendances au-delà de 2021.

Dans le scénario « Higher growth higher EE », le Shift Project fait l'hypothèse que l'efficacité énergétique s'améliore plus rapidement à partir de 2015 et actualise 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.

Le scénario « Superior growth peaked EE » est une variante du scénario précédent, qui « 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 ».

Pour le besoin de ce rapport, on retiendra donc l'actualisation du Shift Project en distinguant l'évolution récente de la consommation sur la période pour laquelle le Shift Project disposait de données (période 2013-2017) et les projections d'évolution jusqu'en 2025.

## 1.2. Évolution de la consommation globale du numérique entre 2013 et 2017

### *Entre 2013 et 2017, la consommation du numérique est passée de 2 000 à 3 000 TWh/an*

Sur la période courant entre 2013 et 2017, les trois scénarios hors sobriété du Shift Project sont quasiment identiques. Pour simplifier la lecture des résultats, on retient pour les besoins de ce document le scénario « Expected updated ».

**Tableau 4 – Évolution de la consommation énergétique du numérique entre 2013 et 2017 (en TWh/an)**

	2013	2014	2015	2016	2017	Taux de croissance annuel moyen 2013/2017
Consommation d'énergie en TWh/an	2 026	2 142	2 373	2 666	2 990	10,2 %

Source : Shift Project, 2018

En appliquant ce scénario, le Shift Project estime la consommation énergétique mondiale du numérique à quasiment 3 000 TWh par an en 2017. À titre de comparaison, la consommation

électrique actuelle de l'Union européenne (UE-28) tous secteurs confondus<sup>20</sup> est d'environ 3 300 TWh par an<sup>21</sup>.

Par ailleurs, le tableau 4 montre que sur la période 2013-2017, la consommation énergétique du numérique a crû de 50 %, alors que la consommation électrique mondiale augmentait sur cette même période d'un peu moins de 10 %.

### a) Répartition de la consommation entre les différents segments

Pour comprendre les moteurs de cette croissance forte de la consommation du numérique, il convient d'évaluer le poids respectif de chaque segment du numérique, à savoir les consommations en phase usage des équipements terminaux, des réseaux et des data centers, ainsi que la consommation nécessaire à leur production.

**Tableau 5 – Distribution de la consommation des différents segments (en TWh et en % de la consommation totale) entre 2013 et 2017 et taux de croissance annuels**

	2013	2017	Taux de croissance annuel moyen 2013/2017
<b>Équipements terminaux</b>	380 (18,8 %)	575 (19,2 %)	10,9 %
<b>Réseaux</b>	435 (21,4 %)	478 (16 %)	2,4 %
<b>Data centers</b>	323 (15,9 %)	593 (19,8 %)	16,4 %
<b>Production</b>	889 (43,9 %)	1344 (44,9 %)	10,9 %
<b>Total</b>	2026 (100 %)	2990 (100 %)	10,2 %

Source : Shift Project, *Lean ICT Materials Forecast Model*, 2018

Le tableau 5 illustre la place prépondérante de la production des équipements numériques sur la période 2013-2017. Le rapport Lean ICT du Shift Project a permis de mettre en lumière un segment qui, largement ignoré dans les publications jusque-là, représente pourtant depuis 2013 quasiment la moitié de la consommation énergétique du numérique.

La consommation restante du numérique, liée à sa phase usage, se répartit quant à elle de manière relativement équilibrée entre les équipements terminaux, les data centers et les réseaux.

L'étude de la croissance de la consommation de ces quatre segments sur la période étudiée permet de compléter l'analyse. En effet, bien que la croissance de la consommation énergétique soit portée par les quatre segments du numérique, qui évoluent tous à la hausse depuis 2013, on note des disparités dans les taux de croissance respectifs de ces segments :

<sup>20</sup> Rappelons toutefois que la consommation électrique ne représente qu'une sous-partie de la consommation énergétique de l'UE.

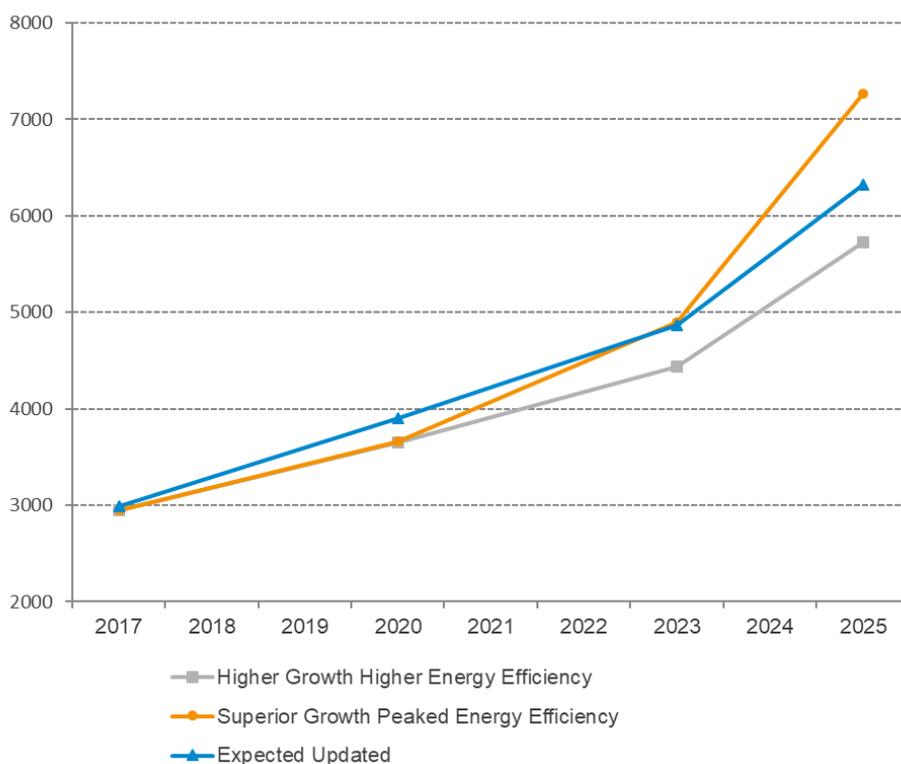
<sup>21</sup> Selon le European Network of Transmission System Operators for Electricity, pour la période allant de juin 2017 à juin 2018.

les data centers sont le segment qui progresse le plus rapidement avec un taux de croissance annuel de 16,4 % sur la période, suivis par les équipements terminaux et la production avec un taux de 10,9 % chacun. Les réseaux télécoms progressent nettement moins vite avec un taux de croissance annuel de 2,4 %.

### 1.3. Évolutions possibles de la consommation du numérique à horizon 2025

#### 1.3.1. Une consommation qui devrait se situer entre 5 700 et 7 300 TWh par an en 2025

**Graphique 13 – Projections de consommation globale du numérique entre 2017 et 2025 en TWh par an**



Source : Shift Project, *Lean ICT Materials Forecast Model*, 2018

Selon le Shift Project, en fonction du scénario retenu, la consommation énergétique du numérique devrait se situer en 2025 entre 5 700<sup>22</sup> et 7 300<sup>23</sup> TWh par an avec une valeur attendue estimée à 6 300 TWh par an (Graphique 13).

Ces projections sont assez alarmantes puisqu'elles montrent que si rien n'est fait pour contenir la croissance du parc d'équipements et l'explosion du trafic, un doublement de la consommation énergétique du numérique devrait être constaté entre 2017 et 2025.

<sup>22</sup> Scénario Higher Growth Higher Energy Efficiency.

<sup>23</sup> Scénario Superior Growth Peaked Energy Efficiency.

**Tableau 6 – Prévisions d'évolution de la consommation globale (en TWh par an) et taux de croissance annuel moyen entre 2017 et 2025**

	2017	2025	CAGR 2017 - 2025
<i>Expected Updated</i>	2990	6326	9,8 %
<i>Higher Growth Higher Energy Efficiency</i>	2951	5723	8,6 %
<i>Superior Growth Peaked Energy Efficiency</i>	2951	7270	11,9 %

Source : Shift Project, *Lean ICT Materials Forecast Model, 2018*

La croissance de cette consommation globale devrait donc se poursuivre à un rythme sensiblement similaire à celui de la période 2013-2017, soit entre 9 % et 12 % par an (Tableau 6).

### 1.3.2. Projections par segment en 2025

**Tableau 7 – Projections de la consommation des différents segments (en TWh par an et en % de la consommation totale) en 2025**

	Expected Updated	Higher Growth Higher EE	Superior Growth Peaked EE
<b>Équipements terminaux</b>	908 (14,4 %)	908 (15,9 %)	908 (12,5 %)
<b>Réseaux</b>	1 007 (15,9 %)	1 166 (20,4 %)	1 562 (21,5 %)
<b>Data centers</b>	1 918 (30,3 %)	1 236 (21,6 %)	2 040 (28,1 %)
<b>Production</b>	2 492 (39,4 %)	2 413 (42,2 %)	2 759 (38 %)
<b>Total</b>	6 326 (100 %)	5 723 (100 %)	7 270 (100 %)

Source : Shift Project, *Lean ICT Materials Forecast Model, 2018*

Dans les trois scénarios (Tableau 7), la **production reste le principal segment de consommation**. Ce segment devrait en effet consommer entre 2 400<sup>24</sup> et 2 800<sup>25</sup> TWh par an avec une **valeur attendue estimée à 2 500 TWh par an et représentant environ 39 % de la consommation totale** (contre 45 % en 2017).

L'écart devrait cependant diminuer de manière notable, voire très forte, avec les **data centers** dont la consommation se situerait entre 1 200<sup>26</sup> et 2 000<sup>27</sup> TWh par an, **avec une valeur attendue estimée à 1 900 TWh par an et représentant environ 30 % de la consommation totale** (contre 20 % en 2017).

<sup>24</sup> Scénario Higher Growth Higher Energy Efficiency.

<sup>25</sup> Scénario Superior Growth Peaked Energy Efficiency.

<sup>26</sup> Scénario Higher Growth Higher Energy Efficiency.

<sup>27</sup> Scénario Superior Growth Peaked Energy Efficiency.

Le troisième poste devrait être les **réseaux télécoms**, dont la consommation devrait se situer entre 1 000 et 1 600 TWh par an, avec une **valeur attendue à 1 000 TWh par an et représentant environ 16 % de la consommation totale** (même part qu'en 2017).

Enfin les **équipements terminaux** verraient leur part dans la consommation totale du numérique diminuer avec une **consommation estimée à 900 TWh par an**, quel que soit le scénario retenu, **et représentant environ 14 % de la consommation totale** (contre 19 % en 2017).

**Tableau 8 – Taux de croissance annuels des différents segments entre 2017 et 2025 en fonction des scénarios**

	Expected updated	Higher Growth Higher EE	Superior Growth Peaked EE
<b>Équipements terminaux</b>	5,9 %	5,9 %	5,9 %
<b>Réseaux</b>	9,8 %	11,8 %	16 %
<b>Data centers</b>	15,8 %	10,4 %	17,6 %
<b>Production</b>	8 %	7,6 %	9,5 %

Source : Shift Project, *Lean ICT Materials Forecast Model, 2018*

Le tableau 8 montre que si la consommation de l'ensemble des segments devrait continuer d'augmenter, chaque segment dispose d'une dynamique qui lui est propre et qui varie dans le temps. Ces variations expliquent l'évolution de la hiérarchie de consommation des différents segments évoquée *supra*.

Ainsi, par rapport à la période 2013-2017, la croissance annuelle de la consommation des équipements terminaux ralentit fortement sur la période 2017-2025 pour s'établir à environ 6 % par an (contre quasiment 11 % sur la période précédente).

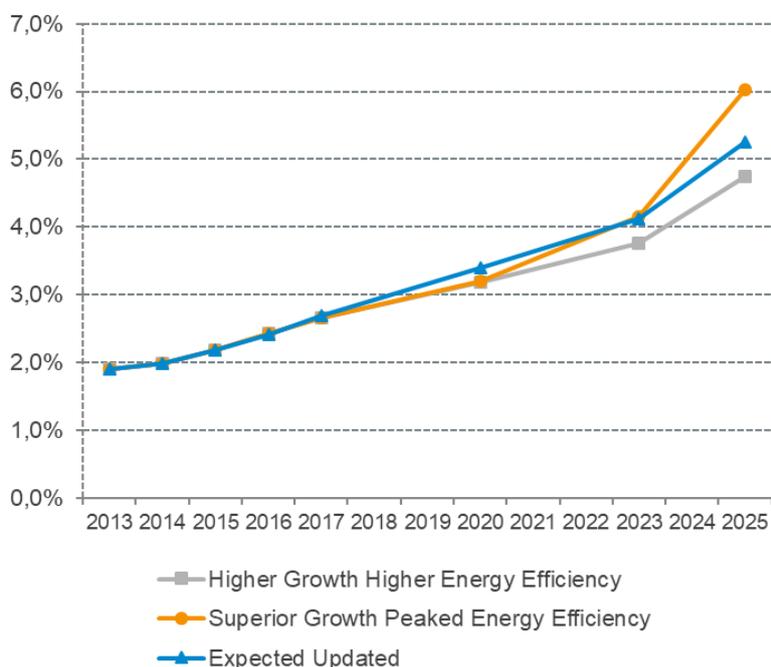
Au contraire, concernant les réseaux télécoms, le Shift Project prévoit une reprise de la croissance annuelle de la consommation supérieure ou égale à 10 % par an sur la période étudiée (contre 2,4 % précédemment).

La consommation liée à la phase de production et celle des data centers évoluent moins : la croissance de la consommation liée à la production devrait être légèrement en retrait sur la période étudiée (entre 8 % et 9,5 %) par rapport à la période 2013-2017 (quasiment 11 %), tandis que la croissance de la consommation des data centers devrait poursuivre sur sa lancée avec un taux annuel proche des 16 % (sauf en cas d'amélioration de l'efficacité énergétique).

#### **1.4. Le numérique représente une part croissante de la consommation énergétique mondiale**

On a vu que le numérique consomme une quantité croissante d'énergie. Cependant ce constat doit être mis en perspective avec le reste de la consommation mondiale tous secteurs confondus. Le taux de croissance de la consommation énergétique du numérique est-il particulièrement fort ou s'inscrit-il dans une tendance générale ?

**Graphique 14 – Projections de l'énergie consommée par le numérique au regard de la consommation énergétique mondiale**



Source : Shift Project, *Lean ICT Materials Forecast Model, 2018*

Pour cette mise en perspective, le Shift Project se base sur les projections de l'AIE avec un scénario de consommation globale d'énergie finale au niveau mondial croissant à un taux de 1,5 % par an et évoluant de 111 318 TWh en 2017 à 120 541 TWh en 2025<sup>28</sup>. **Selon le Shift Project, en 2017 le numérique représente environ 2,7 % de la consommation globale d'énergie finale au niveau mondial** contre 1,9 % en 2013 (Graphique 14).

**En 2025, en fonction du scénario retenu, le numérique devrait consommer entre 4,7 % et 6 % de la consommation globale d'énergie finale avec un scénario attendu à 5,2 %, soit un quasiment doublement par rapport à 2017.**

Cela s'explique car le taux de croissance de la consommation globale d'énergie finale attendu est de 1,5 %<sup>29</sup>, soit un taux bien inférieur à celui du numérique.

On voit, avec cette mise en perspective, que ce n'est pas seulement le taux de croissance proche de 10 % qui pose question, mais sa comparaison avec les tendances globales.

Cette analyse montre donc qu'en l'absence d'un réel volontarisme au niveau des pratiques de consommation du numérique, la part du numérique dans le bilan énergétique mondial est amenée à croître encore plus rapidement dans les prochaines années.

<sup>28</sup> Voir Shift Project, *Lean ICT Materials Forecast Model, 2018*.

<sup>29</sup> Taux retenu par le Shift Project dans son rapport *Lean ICT*.

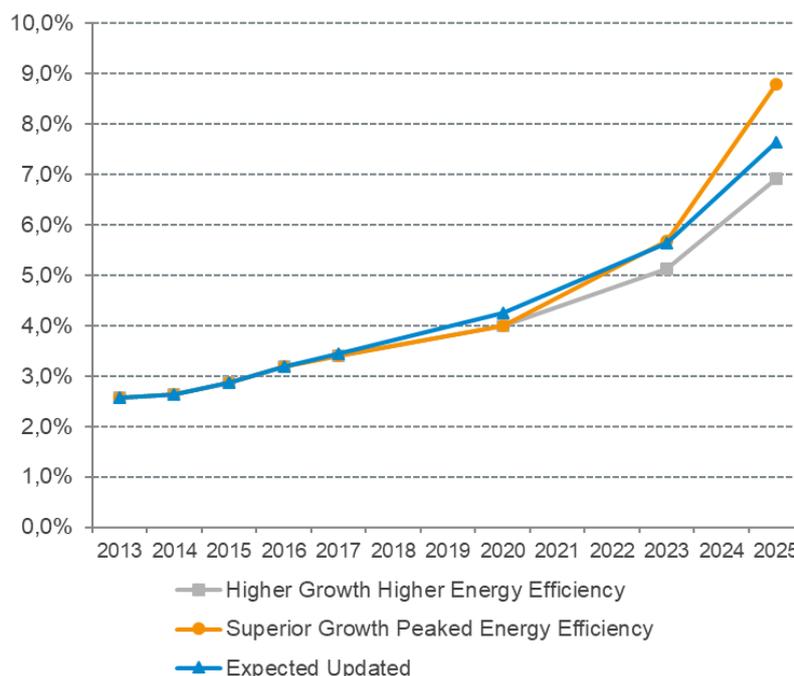
## 1.5. Des émissions de gaz à effet de serre supérieures à celles du transport aérien civil

Reprenant une analyse lancée par Andrae et Edler, le Shift Project propose également une transcription des résultats de son étude sur la consommation énergétique en émissions de gaz à effet de serre. Celle-ci inclut les phases de production et d'utilisation, qui répondent à deux méthodes de calcul distinctes :

- concernant la phase de production, il s'agit d'une évaluation de la quantité de gaz à effet de serre émise par les activités d'extraction, de production et d'assemblage des composants ;
- concernant la phase d'utilisation, il s'agit du résultat de l'application d'un facteur d'intensité carbone à la consommation énergétique exposée. L'étude distingue quatre facteurs différents, reposant sur les mix électriques de quatre régions (États-Unis, UE, France, Chine).

Pour cette mise en perspective, le Shift Project retient un scénario d'évolution globale des émissions d'équivalent CO<sub>2</sub> au niveau mondial passant de 52 GtCO<sub>2</sub>eq en 2017 à 48 GtCO<sub>2</sub>eq en 2025<sup>30</sup>.

**Graphique 15 – Projections de la part du numérique dans les émissions mondiales de GES**



Source : Shift Project, *Lean ICT Materials Forecast Model*, 2018

**Le Shift Project estime qu'en 2017 le numérique génère environ 1,8 gigatonne d'équivalent CO<sub>2</sub>, représentant 3,4 % des émissions mondiales (Graphique 15).**

<sup>30</sup> Voir Shift Project, *Lean ICT Materials Forecast Model*, 2018.

À titre de comparaison, le Shift Project rappelle qu'en 2018, le transport aérien civil – un secteur particulièrement décrié pour ses émissions de gaz à effet de serre – représentait environ 2 % des émissions mondiales.

Selon les projections du Shift Project, **à horizon 2025, les émissions du numérique atteindraient 3,3 à 4,2 GtCO<sub>2</sub>eq. Le numérique devrait ainsi représenter entre 6,9 et 8,8 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre avec un scénario attendu à 7,6 %, soit un doublement de la part de ce secteur.** Cette croissance de l'empreinte carbone du numérique doit être interprétée au regard des objectifs fixés par l'accord de Paris, à savoir contenir l'augmentation des températures moyennes sous les deux degrés d'ici 2100.

Or, compte tenu des objectifs, on comprend que la hausse de la consommation numérique prévue par le Shift Project serait trop dommageable aux résultats finaux pour que ceux-ci correspondent avec l'accord de Paris : selon leur rapport, il faudrait une réduction cumulée de 11 GtCO<sub>2</sub>eq entre 2018 et 2023, alors que la croissance de la consommation énergétique du numérique sur la même période correspond à elle seule à plus de 1 GtCO<sub>2</sub>eq. En somme, il faudrait ainsi une réduction de 12 GtCO<sub>2</sub>eq entre 2018 et 2023 pour compenser la hausse du secteur du numérique.

## 1.6. Conclusion

L'étude de la consommation énergétique du numérique confirme donc bien que ce secteur consomme une quantité d'énergie très loin d'être négligeable pour alimenter sa croissance. Cependant, ce n'est pas seulement le niveau de cette consommation énergétique qui est inquiétant, mais surtout la tendance haussière constatée entre 2013 et 2017 et qui devrait se prolonger à horizon 2025.

Au final c'est donc l'accumulation de ces trois critères – un secteur parmi les plus énergivores, une croissance à contre-courant des objectifs que s'est fixés l'humanité et une absence de prise de conscience d'une responsabilité sectorielle – qui doit nous interpeller et guider les pouvoirs publics dans la définition de politiques de maîtrise des impacts environnementaux du numérique.

## 2. Focus sur la consommation énergétique de deux technologies émergentes

Comme expliqué plus haut, les modélisations d'Andrae et Edler sur lesquelles le Shift Project se fonde pour estimer les évolutions probables de la consommation énergétique du numérique ont pour principale limite leur ancienneté. Il n'est donc pas étonnant que ces modélisations n'intègrent pas la consommation énergétique de deux technologies émergentes – les crypto-monnaies et l'internet des objets (ci-après « IoT » pour Internet of Things) – qui pourraient modifier les ordres de grandeur et les équilibres annoncés.

Dans un premier temps, la consommation énergétique des blockchains publiques et de leurs applications dans le domaine des crypto-monnaies sera abordée. Le cas particulier de la blockchain Bitcoin sera tout particulièrement traité. Dans un second temps, cette étude se penchera sur la consommation des technologies liées à l'internet des objets.

## 2.1. La consommation énergétique des crypto-monnaies reposant sur des blockchains publiques

Une blockchain, littéralement « chaîne de blocs », est une technologie de stockage et d'échange d'informations sans organe de contrôle ni intermédiaire. Contrairement à une base de données « classique » où les informations sont centralisées au sein de quelques serveurs/data centers, les données sont ici stockées dans des « blocs », objets virtuels de tailles identiques, qui sont répliqués sur les postes locaux de chacun des utilisateurs, aussi appelés « nœuds » du réseau. Aucun de ces nœuds n'a plus de pouvoir sur la base de données que les autres.

Se pose alors la question de la gouvernance de la blockchain et plus spécifiquement comment certifier la véracité de l'information émise par un nœud, et comment réagir en cas de malveillance de certains nœuds du réseau. Contrairement aux bases de données classiques où la gouvernance est remise à un tiers de confiance, les technologies Blockchain s'appuient sur des systèmes de consensus décentralisés et sans intermédiaire, tels que la « Proof of Work » (PoW) ou « preuve de travail » et la « Proof of Stake » (PoS) ou « preuve de participation », dont les principes de fonctionnement, une fois mis à l'échelle, sont réputés engendrer des consommations énergétiques affolantes.

Cette partie traitera plus particulièrement des consommations énergétiques engendrées par les crypto-monnaies, monnaies virtuelles cryptographiques, qui fonctionnent pour la plupart sous preuve de travail, comme le Bitcoin.

Cependant, une tendance à la substitution des systèmes fonctionnant sur des preuves de travail, par des systèmes reposant sur des preuves de participation étant observée, cette partie s'intéressera également aux enjeux de cette transition d'un point de vue énergétique.

### 2.1.1. Évaluer la consommation énergétique des crypto-monnaies sous preuve de travail

#### *Une consommation énergétique inhérente au système de preuve de travail*

Comme évoqué *supra*, une blockchain, au sens général du terme, est une chaîne de blocs de données, où chaque bloc contient plusieurs transactions entre divers protagonistes. Chacun des blocs est marqué du numéro du bloc précédent, ce qui permet ainsi, lorsqu'on remonte au premier bloc édité, de retracer l'ensemble de l'historique des transactions depuis la création d'une blockchain.

La Preuve de Travail est un système dans lequel un bloc est considéré comme « légitime » à partir du moment où sa validation a nécessité une certaine quantité de « travail », c'est-à-dire qu'une certaine « énergie de calcul » a été mise à disposition du réseau.

Le système par preuve de travail permet de sécuriser la blockchain Bitcoin depuis sa création<sup>31</sup>. Sans entrer dans les détails techniques, pour qu'un nouveau bloc de transactions soit accepté, il doit préalablement avoir été « miné » par les utilisateurs, c'est-à-dire que ceux-ci doivent mettre

---

<sup>31</sup> Bien que la presse relaie des attaques sur cette Blockchain, ces attaques ont eu lieu à l'encontre des plateformes gravitant autour de celle-ci, et non directement contre elle.

la puissance de calcul de leur ordinateur à disposition du réseau. Il s'agit en pratique de trouver aléatoirement un code de sortie arbitraire, permettant aux transactions comprises dans le bloc d'être validées et enregistrées. Miner consiste donc à utiliser la puissance de calcul d'un ordinateur pour trouver ce résultat ; cette opération est communément appelée *hash*. La difficulté de résolution est fonction de la puissance de calcul, ou *hashrate*, disponible sur l'ensemble du réseau : ainsi, modifier une transaction réclamerait une telle puissance de calcul (51 % du total) qu'il est impossible pour un utilisateur seul ou pour un cartel de la mobiliser dans l'intervalle séparant la création de deux blocs (10 minutes). Quand bien même cela serait possible, il serait de fait plus rentable de « miner » le prochain bloc pour obtenir la récompense attendue plutôt que de tenter de corrompre une chaîne. Une fois trouvé, le bloc est accepté sur la chaîne, les transactions sont validées, le mineur ayant trouvé le bon code est récompensé en Bitcoins, un nouveau bloc est généré et le processus recommence.

En définitive, le système de gouvernance du Bitcoin consiste à faire effectuer plusieurs milliards de fois un calcul simple par les utilisateurs du réseau. En guise d'image, Andreas M. Antonopoulos, auteur du livre *Au cœur du Bitcoin – Programmer la Blockchain ouverte*, compare ce procédé à un concours de sudoku, dont les grilles deviennent de plus en plus difficiles à mesure que la puissance de calcul augmente : chaque ordinateur propose une solution aléatoire, jusqu'à ce qu'une des solutions soit la bonne.

Cette procédure est, à faible échelle, peu énergivore. En 2009, avant l'essor du Bitcoin, il était possible de « miner » avec un ordinateur personnel, compte tenu du peu d'utilisateurs présents sur le réseau. Cependant, la montée drastique du cours du Bitcoin (de quelques centimes d'euros lors de son lancement, à plus de 16 000 euros l'unité fin 2017, et 9 600 euros en moyenne sur le mois de juillet 2019) a incité les mineurs à démultiplier les infrastructures de calcul pour essayer de toucher les récompenses émises lors de la création de chaque bloc. Bien que cette explosion de la puissance de calcul dédiée au minage du Bitcoin renforce la protection du réseau contre des attaques, la consommation énergétique est également amenée à exploser, comme la partie suivante permettra de le démontrer<sup>32</sup>.

### **La consommation énergétique de Bitcoin : entre 30 et 100 TWh par an en 2018**

Quatre méthodes de calcul de la consommation énergétique du Bitcoin seront présentées dans cette partie. Bien que reposant sur des variables différentes, leur convergence en termes d'ordre de grandeur permet de conforter les estimations proposées. Il est essentiel de noter que ces calculs prennent uniquement en compte la consommation électrique en phase d'utilisation : ils excluent l'énergie dite « grise », nécessaire à la production des éléments de minage.

#### *La méthode économique : entre 30 et 100 TWh par an*

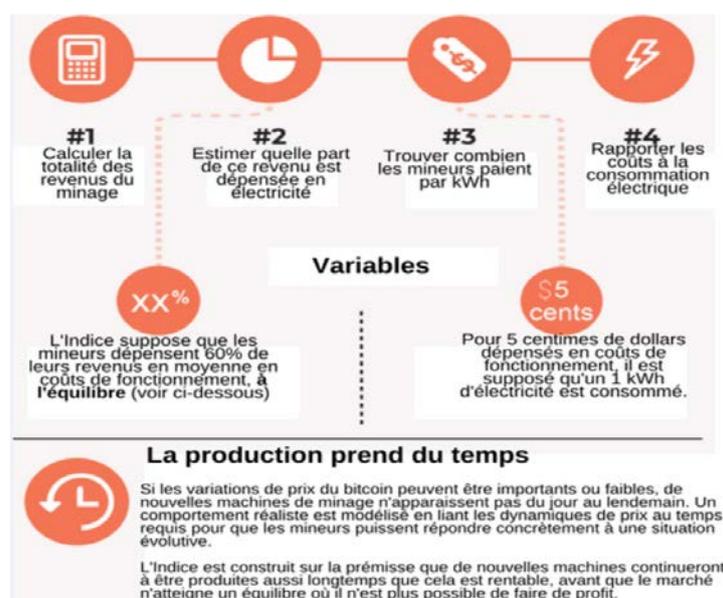
La méthode dite « économique »<sup>33</sup> est présentée par son créateur dans la figure 3.

---

<sup>32</sup> Pour plus d'informations sur le fonctionnement des blockchains, voir le rapport publié en juin 2018 par France Stratégie [Les enjeux des blockchains](#).

<sup>33</sup> Les chiffres suivants proviennent d'un rapport du Sénat publié le 18 juillet 2019, intitulé « *Comprendre les blockchains : fonctionnement et enjeux de ces nouvelles technologies* ». Cette méthode sert également de base au Bitcoin Energy Consumption Index présenté par le site Digiconomist, une des références sur le sujet, à l'adresse : <https://digiconomist.net/bitcoin-energy-consumption>.

Figure 3 – Variables de la méthode « économique »



Source : Digiconomist

En faisant l'hypothèse pessimiste qu'un mineur dépense la totalité de ses revenus en bitcoin dans les frais de minage et que 60 % de ces frais soient réservés à l'électricité, la consommation électrique du Bitcoin serait de 100 TWh/an. Une hypothèse optimiste consisterait alors à considérer que le mineur dépense 90 % de ses revenus dans les infrastructures de minage, et que 40 % de ce montant serait dédié à l'achat d'électricité, la consommation électrique du Bitcoin serait ainsi de 30 TWh/an. Selon cette méthode, la consommation électrique de la cryptomonnaie se situe quelque part entre les deux hypothèses.

*Méthode dite de Bevand : 40 TWh par an*

Une seconde méthode de calcul<sup>34</sup>, s'appuyant sur les travaux de Marc Bevand, part de la puissance du réseau et du cours du bitcoin, données publiques, pour remonter vers les machines utilisées et déterminer leur consommation. Cette méthode exige donc d'établir un prix unique de l'électricité (sachant que les utilisateurs se situent aux quatre coins du monde), une liste des outils de minage utilisés, ainsi que leur nombre et leur consommation énergétique. Selon le rapport du Sénat, cette méthode estime la consommation énergétique du Bitcoin en juin 2018 à environ 40 TWh, compte tenu d'un cours situé entre 5 440 et 7 200 euros et d'une puissance de réseau oscillant entre 43 000 000 et 33 000 000 terahashes par seconde.

*Méthode d'évaluation de la consommation minimale : 31 TWh par an*

Une autre méthode de calcul<sup>35</sup> s'inspire des travaux de Karl J. O'Dwyer et David Malone, pionniers dans la recherche sur la consommation énergétique du Bitcoin. Elle permet d'aboutir à un minimum de la consommation électrique de la blockchain Bitcoin. Il s'agit de diviser la

<sup>34</sup> Rapport du Sénat publié le 18 juillet 2019, intitulé *Comprendre les blockchains : fonctionnement et enjeux de ces nouvelles technologies*.

<sup>35</sup> *Ibid.*

puissance du réseau par l'efficacité électrique de l'outil de minage le plus performant : on trouve alors le nombre d'unités de l'appareil nécessaire pour atteindre une telle puissance. Sa consommation énergétique établie, il suffit de la multiplier par le nombre d'appareils, pour obtenir une valeur minimum de la consommation énergétique du bitcoin, le parc des équipements de minage étant nécessairement moins efficace que celui utilisé ici. Ainsi :

- pour une puissance de réseau de  $36 \cdot 10^{18}$  Ghashs/s (2 juin 2018),
- pour l'appareil le plus efficace énergétiquement, atteignant  $13,5 \cdot 10^{12}$  hash/s pour une consommation de 1 323 W/h,
- on obtient le nombre de 2 666 000 unités ( $36 \cdot 10^{18} / 13,5 \cdot 10^{12}$ ),
- $2\,666\,000 \cdot 1323 = 3\,527\,118\,000$  W/h.

En extrapolant ce chiffre à l'année, on trouve environ 31 TWh par an, correspondant au minimum de la consommation énergétique de bitcoin. Parmi les méthodes étudiées, celle-ci propose le résultat le plus précis, puisqu'elle s'appuie uniquement sur des données publiques trouvables sur les sites de la fondation Bitcoin. Deux mois plus tôt, on trouvait 24 TWh/an en recourant à la même méthode, témoignant de la croissance extrêmement rapide de la consommation énergétique.

*Méthode dite de Prat : entre 30 et 60 TWh par an*

Enfin, un dernier modèle théorique proposé par Julien Prat<sup>36</sup> établit une corrélation étroite entre dépense énergétique et valeurs maximums atteintes par le Bitcoin dans le passé. Selon lui, l'activité de minage a deux caractéristiques déterminantes : l'investissement est irréversible (les machines ne servent qu'à miner, et continuent malgré une chute du cours), et le retour sur investissement est risqué car le cours est très volatil. Aussi les mineurs potentiels investissent-ils passé un certain seuil, à partir duquel ils estiment l'investissement rentable. Compte tenu de la durée de vie moyenne d'une machine, de son prix et de la consommation énergétique de son fonctionnement (600 euros), Julien Prat situe la consommation énergétique de Bitcoin entre 30 et 60 TWh en juin 2018.

En définitive, les méthodes exposées plus haut permettent d'affirmer que la consommation électrique du minage du Bitcoin (phase d'utilisation seule) correspond à un montant de plusieurs dizaines de TWh par an, équivalant à la consommation électrique de pays entiers (entre une et trois fois la consommation électrique du Danemark). Pour obtenir la consommation énergétique totale du Bitcoin, il serait nécessaire d'ajouter la consommation des équipements accessoires de refroidissement (nécessaire pour éviter la surchauffe des équipements de calcul), ainsi que l'énergie grise liée à la production des appareils. Il conviendrait également de prendre en compte la consommation liée au phénomène de crypto-jacking, consistant à installer des logiciels de minage sur des ordinateurs sans le consentement de l'utilisateur pour en détourner la puissance de calcul.

---

<sup>36</sup> Intervention pour France Stratégie en juin 2018, sur « L'empreinte écologique de Bitcoin ».

### **La consommation totale de l'ensemble des crypto-monnaies sous preuve de travail : le double de la consommation du Bitcoin**

Suite aux considérations économiques réalisées précédemment, et en s'appuyant sur la capitalisation du Bitcoin qui représente 40 % de l'ensemble des crypto-monnaies à preuve de travail, on peut estimer la consommation électrique de l'ensemble des crypto-monnaies s'appuyant sur une preuve de travail en multipliant les résultats précédents par deux<sup>37</sup>, soit entre 60 et 200 TWh par an.

### **Implications sociales, politiques et environnementales de la preuve de travail**

Ces consommations énergétiques importantes et probablement non anticipées lors de la création du Bitcoin permettent de tirer plusieurs enseignements pour l'avenir.

Il est ainsi essentiel de noter que la consommation électrique de bitcoin a déjà eu des répercussions politiques importantes à l'échelle d'États entiers.

Le Québec, qui dispose d'une électricité bon marché grâce à ses centrales-hydroélectriques, a vu dans le minage une opportunité pour écouler ses surplus à partir de 2017<sup>38</sup>. Contacté par des exploitants de fermes de minage, le géant public québécois de l'énergie hydro-électrique, Hydro-Québec, a négocié des contrats directement avec eux. Ces derniers cherchent à optimiser leurs coûts fixes, en profitant notamment, au-delà d'un faible coût de l'électricité, des basses températures qui limitent les coûts de refroidissement. Cependant, en 2018, ayant très vite atteint la quote-part d'électricité qu'elle souhaite allouer au minage, et craignant face à un afflux de demandes de nouvelles fermes pour la sécurité des approvisionnements, l'entreprise a demandé à la Régie de l'énergie la fixation de tarifs dissuasifs pour les nouveaux contrats de minage<sup>39</sup>.

Plus récemment, la Chine, bien qu'étant le premier « producteur » mondial du Bitcoin (les chiffres oscillent entre 40 % et 80 % du minage mondial), a laissé entendre qu'elle envisageait d'interdire complètement le Bitcoin. Parmi les raisons avancées, on trouve le coût énergétique et environnemental de cette crypto-monnaie<sup>40</sup>. Les défenseurs de la crypto-monnaie estiment qu'il s'agit en réalité pour le gouvernement chinois d'empêcher l'émergence d'une monnaie échappant au contrôle de l'État central.

Toujours est-il que ces deux exemples montrent que les crypto-monnaies sont déjà un enjeu de politique publique à plusieurs niveaux : économique, environnemental, politique.

Il convient ensuite de nuancer la consommation énergétique réelle de Bitcoin. Julien Prat explique que la localisation des fermes de minage à proximité d'espaces de surproduction d'électricité amène à en relativiser l'impact. À ce titre, le cas du Québec est éloquent, puisqu'il

---

<sup>37</sup> Intervention de Jean-Paul Delahaye pour France Stratégie en juin 2018.

<sup>38</sup> « Le bas coût de l'électricité au Québec intéresse l'industrie mondiale du bitcoin », *Radio Canada*, 13 novembre 2016.

<sup>39</sup> « [Hydro-Québec allowed to charge cryptocurrency miners increased rates](#) », *Montreal Gazette*, 16 juillet 2018.

<sup>40</sup> « La Chine envisage d'interdire le minage du Bitcoin », *La Tribune*, 10 avril 2019.

s'agissait pour l'entreprise de vendre des surplus qui auraient autrement été perdus<sup>41</sup>. Ainsi, les résultats présentés dans la partie précédente doivent être minorés d'un montant équivalent aux surplus écoulés pour représenter le coût énergétique réel de bitcoin.

### ***Vers une régulation du minage ?***

Concernant la régulation du minage, plusieurs leviers se présentent. La régulation de l'émission monétaire, soit la récompense des mineurs, est a priori une bonne idée. Pourtant, le protocole de Bitcoin prévoit déjà un contrôle de l'offre monétaire grâce au mécanisme des « halvings », événements programmés tous les quatre ans consistant à diviser par deux la rémunération des mineurs. Si ce procédé aurait dû avoir un impact sur la consommation électrique liée au Bitcoin, en rendant de nombreuses infrastructures de minage massivement non rentables, entraînant leur débranchement dans un second temps, force est de constater que cela n'est pas le cas.

Plusieurs constats empiriques tendent à montrer le contraire. Entre le halving de novembre 2012 et celui de juillet 2016, la valeur de Bitcoin passe d'environ 10 euros à plus de 590 euros ; après le halving de juillet 2016, le Bitcoin chute de plus d'un quart de sa valeur pour atteindre 459 euros en août, mais atteint pour la première fois les 1 000 euros en janvier 2017, avant une envolée à plus de 16 000 euros en décembre, etc. On constate donc que les halvings n'ont pour l'instant pas eu d'effet régulateur sur la consommation énergétique de Bitcoin, elle-même largement tributaire de son cours. Comme l'écrit le webmaster de *Bitcoin.fr*, « au moment du halving, la diminution de l'inflation aura déjà été intégrée par les marchés, car anticipée. N'espérez donc pas d'importantes variations de prix le jour même. »<sup>42</sup>.

Plus radical mais a priori plus efficace, on peut imaginer un mécanisme d'émission monétaire décroissant avec la hausse du cours, qui permettrait de canaliser l'incitation à l'investissement dans les infrastructures de minage. Ainsi, plutôt qu'une relation linéaire entre le cours et la récompense, celle-ci serait régulé pour éviter une trop grande incitation des mineurs à investir.

Or, comme le souligne Julien Prat, une telle réforme du système est inconcevable aux yeux de la communauté Bitcoin, pour deux raisons :

- la philosophie du Bitcoin, d'origine libertarienne, repose sur son autosuffisance. Autrement dit, une fois mis en route par Satoshi Nakamoto, le protocole Bitcoin fonctionne seul et de manière décentralisée. C'est sur ce contrat explicite que la communauté Bitcoin s'est formée : le rompre ruinerait la confiance des utilisateurs envers le réseau ;
- modifier le protocole réclamerait, sinon l'unanimité, au moins une très large majorité des utilisateurs au cours d'un vote. Or, ceux-ci étant les bénéficiaires du fonctionnement actuel, ils ne voteront vraisemblablement pas en faveur de son amendement.

Si la probabilité de mise en place d'une régulation du minage semble faible, une autre solution mérite d'être instruite : la bascule de la preuve de travail vers un autre type de consensus, telle que la preuve de participation, réputée moins énergivore que la preuve de travail.

---

<sup>41</sup> Intervention pour France Stratégie en juin 2018, sur « L'empreinte écologique de Bitcoin ».

<sup>42</sup> <https://bitcoin.fr/quand-aura-lieu-la-prochaine-division-de-la-prime-de-minage/>.

## 2.1.2. Les preuves de participation constituent-elles une alternative crédible aux preuves de travail ?

### **La preuve de participation et sa consommation énergétique dérisoire**

Il y a quelques années, 95 % des crypto-monnaies<sup>43</sup> fonctionnaient sous des modèles de preuve de travail. Aujourd'hui, elles ne comptent que pour 60 % de la capitalisation totale des crypto-monnaies, et sont progressivement concurrencées par des systèmes à preuve de participation. Avant d'entrer dans la description de ces systèmes, il est essentiel de comprendre que la notion de preuve de participation ne fait référence qu'à un modèle global d'algorithme de consensus, il n'existe en aucun cas une unique preuve de participation parfaitement répliquée. Chaque crypto-monnaie adapte le principe décrit ci-dessous à sa manière.

La preuve de participation ne repose pas sur la puissance de calcul des utilisateurs, mais sur le contenu de leur portemonnaie, qui décrit leur « participation » à la crypto-monnaie. Plus sa participation est élevée, plus l'utilisateur a de chances d'être désigné par le système pour valider le bloc suivant. Étant donné qu'il n'est pas souhaitable que l'utilisateur le plus riche soit systématiquement tiré au sort, plusieurs systèmes de pondération de la participation ont été développés, s'appuyant sur la durée de possession, la quantité de transactions effectuées, etc. Par conséquent, la seule consommation énergétique nécessaire au fonctionnement de la preuve de participation repose sur le fonctionnement des nœuds du réseau, soit les ordinateurs-serveurs qui conservent une copie de la Blockchain.

Si on considère alors un réseau de 10 000 nœuds comme celui de Bitcoin<sup>44</sup>, consommant chacun 2 MWh par an, on obtient une consommation de 0,02 TWh/an. PIVX, une crypto-monnaie possédant un réseau de nœuds similaire à celui du Bitcoin, estime quant à elle sa consommation énergétique à 0,001 TWh/an<sup>45</sup>. Bien que les ordres de grandeur de ces deux estimations diffèrent, la consommation d'une Blockchain fonctionnant sous preuve de participation est dérisoire en comparaison de celle d'une Blockchain sous preuve de travail.

### **Enjeux cryptographiques – Principales failles**

À la différence de la preuve de travail, la preuve de participation est encore jeune, et ne bénéficie pas de la confiance acquise avec le temps dans la solidité du système. En outre, celle-ci présente encore plusieurs failles cryptographiques, théoriques et empiriques. Un groupe d'étudiants en a identifié certaines, et a mené avec succès plusieurs attaques pour vérifier leur théorie, avant de prendre contact avec les équipes concernées<sup>46</sup>.

Lors du séminaire de France Stratégie<sup>47</sup>, Daniel Augot a présenté deux des principales failles cryptographiques des preuves de participation.

---

<sup>43</sup> En termes de capitalisation.

<sup>44</sup> Ce chiffre correspond approximativement au nombre de nœuds publics de la Blockchain Bitcoin.

<sup>45</sup> <https://pivx.org/fr/une-piece-a-faible-consommation/>.

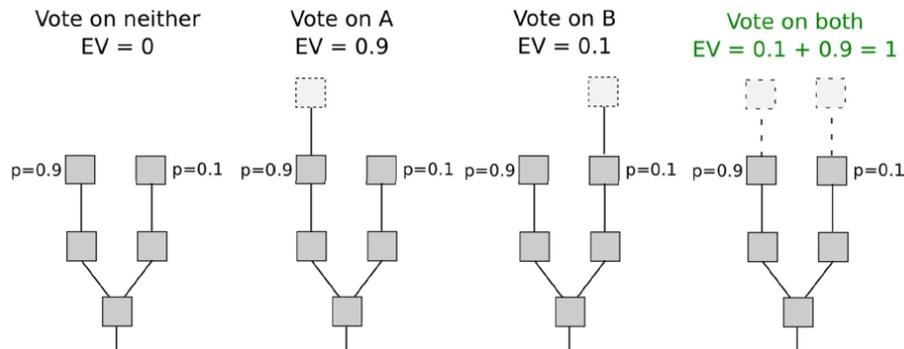
<sup>46</sup> « Les attaques Fake Stake sur les blockchains Proof-of-Stake », *Journal du coin*, 25 janvier 2019.

<sup>47</sup> Séminaire de France Stratégie sur « La consommation énergétique des technologies disruptives » organisé le 4 juin 2018.

*Faillle dite « Nothing at stake »*

D'une part, la première faille repose sur le concept du « Nothing at Stake » ce qui signifie que lorsque deux versions de la blockchain se présentent à un nœud, celui-ci doit voter pour l'une des deux branches, ou bien miner sur les deux branches en même temps.

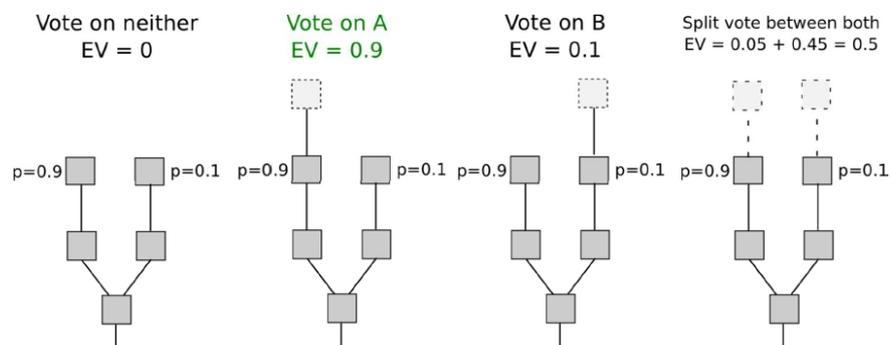
**Figure 4 – Stratégie de vote par preuve de participation**



Source : présentation de Daniel Augot lors du séminaire de France Stratégie

Dans le cas de la preuve de participation (Figure 4), étant donné qu'il n'est pas nécessaire « d'investir » pour voter, les nœuds sont donc incités à voter pour les deux branches et donc permettre à la branche corrompue de se développer.

**Figure 5 – Stratégie de vote par preuve de travail**



Source : présentation de Daniel Augot lors du séminaire de France Stratégie

Dans le cas de la preuve de travail (Figure 5), étant donné qu'il est nécessaire d'investir de la puissance de calcul pour miner une branche, voter pour les deux chaînes impliquerait de diviser sa puissance de calcul par deux sur chacune des branches et donc de diviser ses revenus par deux, ce qui incite les mineurs à voter pour la branche « pertinente ».

*Faillle dite « Stake Bleeding »*

La seconde faille est le « Stake Bleeding », applicable dans le cas où il existe des frais de transaction utilisés pour récompenser les mineurs. Une coalition de mineurs émettant une réplique de la blockchain originale avec l'ensemble des transactions sera récompensée pour

avoir émis ces blocs, ce qui peut permettre à ces mineurs de devenir majoritaires dans leur participation à la blockchain. Par conséquent, cette coalition sera capable de réécrire la blockchain plus vite que la blockchain non corrompue.

La preuve par participation ne peut donc devenir une alternative pertinente à la preuve de travail, qu'à partir du moment où l'on implémente des mécanismes permettant de prévenir les lacunes cryptographiques du modèle initial. Cela correspond, aujourd'hui, à l'introduction d'un organe de gouvernance et donc à une recentralisation partielle de la Blockchain, dont il faudra éprouver l'efficacité sur le long terme. En effet, le concept même de blockchain, tel que défini par son créateur Satoshi Nakamoto, s'est construit contre toute nécessité de centralisation et de médiation dans les échanges<sup>48</sup>. La blockchain peut-elle tolérer une esquisse de centralisation ?

Il convient toutefois de rappeler que, comme le souligne Julien Prat, le passage de la preuve de travail à la preuve de participation est difficile à envisager dans le cas de Bitcoin par exemple, puisque tout l'intérêt de telles crypto-monnaies est de ne pas avoir à subir les revirements d'une autorité supérieure dans son fonctionnement. Comme expliqué *supra*, une rupture avec le protocole n'est envisageable qu'à condition qu'une majorité d'utilisateurs le souhaite, ce qui est hautement improbable dans le cas de Bitcoin. Autrement dit, le développement de la preuve par participation se fera par l'intermédiaire de nouvelles crypto-monnaies, qui devront prendre le pas sur celles utilisant la preuve de travail.

### 2.1.3. Conclusion

Si les crypto-monnaies s'appuyant sur des systèmes de preuve de travail consumaient entre 60 et 200 TWh par an en 2018, soit l'équivalent de la consommation totale de certains pays, il convient de relativiser ces chiffres par rapport à la consommation totale du numérique soit 3 000 TWh par an en 2017. Ce qui dérange certainement le plus, c'est surtout que cette dépense énergétique est perçue comme « non efficace » au regard de l'utilité sociale actuelle des crypto-monnaies, d'autant plus qu'il existe actuellement d'autres systèmes de sécurisation beaucoup moins gourmands en énergie.

## 2.2. L'internet des objets, une nouvelle inconnue dans l'évaluation de la consommation énergétique du numérique

### 2.2.1. Qu'est-ce que l'internet des objets ?

Maison connectée, véhicule connecté, ville connectée, agriculture connectée, industrie 4.0 : de nombreuses évolutions sociétales et industrielles annoncées s'appuient sur la prolifération d'appareils connectés en tout genre regroupés sous l'ombrelle d'internet des objets ou « IoT » (pour « Internet of Things »).

En 2012, l'Union internationale des télécommunications définit l'internet des objets comme une « *infrastructure mondiale pour la société de l'information, qui permet de disposer de*

---

<sup>48</sup> Voir à ce titre le texte de Satoshi Nakamoto, « Bitcoin : système de monnaie électronique en pair-à-pair ».

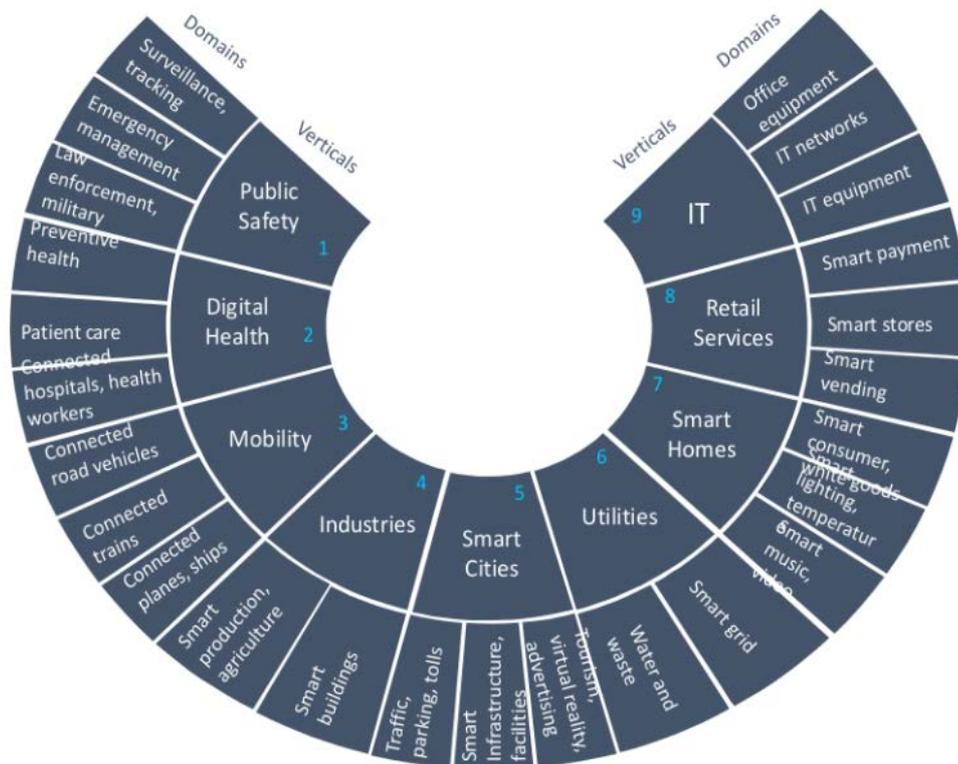
services évolués en interconnectant des objets (physiques ou virtuels) grâce aux technologies de l'information et de la communication interopérables existantes ou en évolution »<sup>49</sup>.

Plus concrètement, l'internet des objets rassemble la diversité des objets capables de collecter des données sur leur environnement, ainsi que de communiquer via des réseaux télécoms avec d'autres appareils connectés.

Le développement attendu de ces objets résulte de la synergie entre trois éléments :

- la prolifération des capteurs (en moyenne de six à neuf capteurs par « objet »), rendue possible par leur drastique baisse de prix en dix ans, qui permet la collecte massive de données de plus en plus diverses ;
- les technologies de communications déjà connues telles que le Wi-Fi ou le Bluetooth, ainsi que la conception de technologies dédiées à ces usages telles que les technologies LWPA (« Low Powered Wide Area »), permettent à ces objets de transférer les données acquises et de communiquer avec d'autres appareils ;
- enfin, l'émergence de ce type d'objets est permise par les possibilités de traitement de quantités massives de données offertes par les infrastructures et technologies liées au « big data ».

**Figure 6 – Les marchés potentiels de l'internet des objets**



Source : Olivier Berder, présentation pour France Stratégie

<sup>49</sup> Document technique de l'UIT, Rec. UIT-T Y.2060 (juin 2012).

La figure 6 montre les marchés sur lesquels l'internet des objets est promis à un bel avenir : de nombreuses applications sont d'ores et déjà envisagées dans une multitude de secteurs, tels que la sécurité publique, la santé, la gestion des réseaux, le transport, la production industrielle, etc.

L'émergence de l'internet des objets dans de nombreux secteurs est censée alimenter la croissance économique mondiale. Ainsi, selon Olivier Berder, les analystes estimaient que le marché devrait représenter plus de 7 à 14 milliers de milliards de dollars, soit entre 50 % et 100 % du PIB européen, en 2018.

### 2.2.2. Demain, des milliards d'objets connectés...

Cette généralisation attendue de l'internet des objets (IoT) dans une multitude de secteurs devrait entraîner une explosion à court terme du nombre d'objets connectés à internet.

De nombreuses estimations et projections du nombre d'objets connectés circulent : des études menées sur l'IoT estiment ainsi que, dès le début des années 2020, leur nombre devrait se situer entre 20 milliards<sup>50</sup>, soit plus que le nombre de téléphones ou de tablettes en circulation aujourd'hui, et 50 milliards<sup>51</sup>.

Il est important de noter que le périmètre retenu dans ces estimations et projections est cependant très variable et pas nécessairement très clair. De nombreuses études intègrent en effet des objets traditionnels, tels que les smartphones, ordinateurs, tablettes et télévisions, qui bien que connectés à internet ne relèvent pas du nouveau segment de l'internet des objets, mais du segment historique de la connectivité des personnes. C'est notamment le cas d'une projection proposée par l'AIE en 2019 dans le cadre d'une modélisation de la consommation énergétique des objets connectés.

Dans le graphique 16, l'AIE prévoit que **le stock d'objets connectés dans le monde, incluant les objets connectés traditionnels** (regroupés dans les catégories « TIC » et « Divertissement »), **devrait passer de 15 milliards en 2018 à 46 milliards en 2030**, ce qui représente une augmentation de 300 % sur cette période et un taux de croissance annuel moyen de 9,8 %.

Le graphique 16 montre cependant que ce n'est pas le segment des objets connectés traditionnels (légère augmentation pour la catégorie « Divertissement » et relative stabilité pour la catégorie « TIC » entre 2018 et 2030) qui porte la croissance extrêmement forte du nombre d'objets connectés dans le monde. La majorité de la croissance est, en effet, portée par les objets regroupés dans la catégorie « Automatisation »<sup>52</sup>.

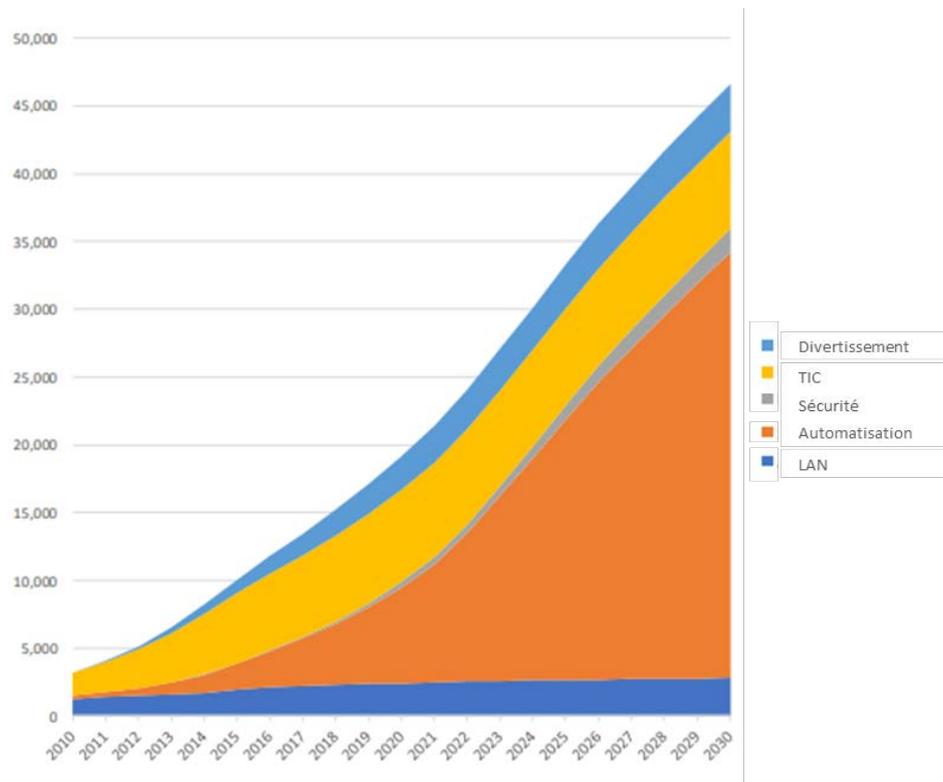
---

<sup>50</sup> Gartner. Inc., dans « Consumer Applications to Represent 63 Percent of Total IoT Applications in 2017 ».

<sup>51</sup> Juniper Research, 2018.

<sup>52</sup> Pour plus d'information sur la composition de la catégorie « Automatisation », voir le rapport de l'AIE, *Total Energy Model for Connected Devices*, juin 2019.

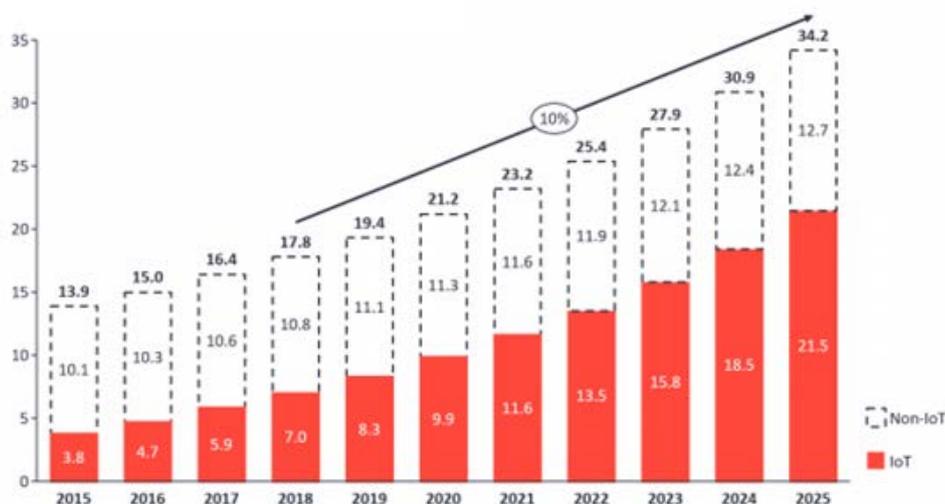
**Graphique 16 – Estimation et projection de l'évolution du stock d'objets connectés par catégories entre 2010 et 2030 (en millions d'objets)**



Note : le graphique présente des estimations pour la période 2010-2017 et des projections à partir de 2018. En 2030, la catégorie représentant le plus gros stock d'objets connectés (plus de 30 milliards) sera dédiée à l'automatisation.

Source : AIE (4E EDNA), Total Energy Model for Connected Devices, 2019

**Graphique 17 – Projection par l'Industrie du nombre d'objets connectés dans le monde entre 2015 et 2025 (en milliards d'objets)**



Note : la période étudiée dans ce graphique et l'échelle retenue sont différentes de celles de l'étude de l'AIE. IoT Analytics précise, par ailleurs, que la catégorie « Non-IoT » inclut tous les téléphones portables, tablettes, ordinateurs et lignes téléphoniques fixes, et que la catégorie IoT comprend tous les objets connectés grand public et B2B.

Source : IoT Analytics, 2018

L'AIE cite, à titre de comparaison, la publication par le groupe industriel de recherche IoT Analytics de résultats similaires, tant sur les ordres de grandeur que sur la faible place du segment des objets connectés traditionnels « non IoT » dans la croissance globale du stock d'objets connectés (Graphique 17), qui semblent conforter ses projections.

### 2.2.3. ...Faisant craindre une explosion de la consommation énergétique du numérique

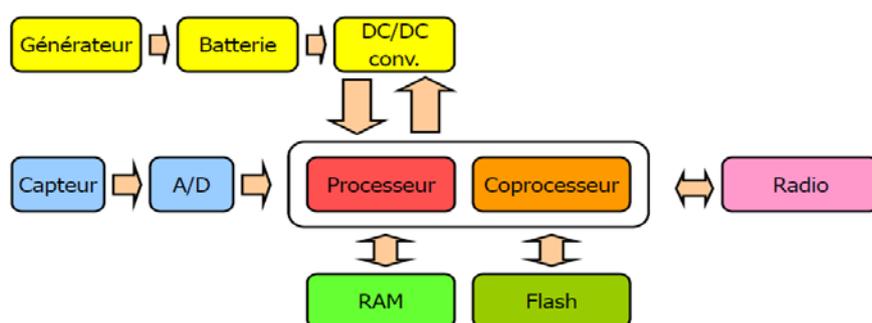
La prolifération des objets connectés dans la prochaine décennie fait craindre une explosion de la consommation énergétique du secteur numérique. En effet, bien qu'à l'origine l'idée sous-jacente à la démocratisation des objets connectés ait notamment été d'optimiser la consommation énergétique dans certaines industries, et que chaque objet représente une consommation unitaire faible, la connexion d'une multitude d'objets n'est pas neutre en termes de consommation énergétique :

- les objets connectés devront a priori être connectés en permanence au réseau, ce qui implique une consommation énergétique même lorsque les objets ne sont pas utilisés pour leur fonctionnalité primaire ;
- le transfert et l'analyse des données issues de ces systèmes d'objets devraient entraîner une consommation accrue sur les segments amont, à savoir les réseaux télécoms et les data centers ;
- l'énergie consommée en phase usage ne représente pas l'entièreté de la consommation énergétique liée à l'utilisation de ces objets, il faut également prendre en compte l'énergie grise nécessaire à leur production.

#### La consommation en phase usage de l'objet connecté

Pour appréhender la consommation énergétique liée à la connexion d'un objet, il convient tout d'abord de comprendre comment il est composé (Figure 7).

Figure 7 – Schéma d'architecture d'un objet connecté



Source : présentation d'Olivier Berder lors du séminaire de France Stratégie

La figure 7 montre que la partie dédiée à la connexion d'un objet est en principe composé :

- d'un système d'alimentation en énergie (en jaune sur le schéma) ;
- d'une chaîne d'acquisition et de conversion des données incluant les capteurs (en bleu) ;
- d'une partie dédiée au traitement des données, composée d'un processeur (en rouge) et éventuellement d'un coprocesseur (en orange) ;

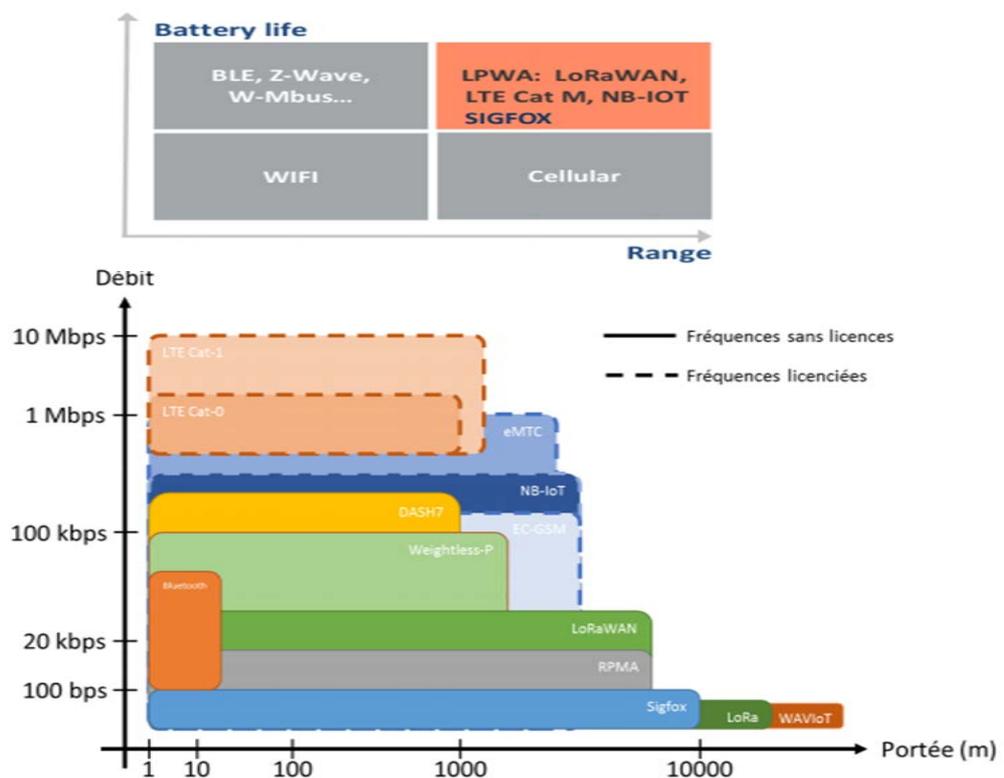
- d'une ou plusieurs unités de stockage des données (en vert) ;
- et enfin d'une partie dédiée à la communication, appelée « radio » (en rose).

Si chacune de ces parties consomme de l'énergie, Olivier Berder indique que la majorité de la consommation énergétique en phase usage de l'objet est générée par la partie communicante de l'objet<sup>53</sup>.

Les équipements de communications dits M2M (pour « machine à machine ») sont au cœur du fonctionnement de l'internet des objets : ils permettent le transfert des données depuis les capteurs vers le centre de traitement des données, puis vers les différents équipements du réseau télécom situés en amont.

Différentes technologies de communication sont utilisées pour l'internet des objets et chacune a ses spécificités.

**Graphique 18 – Comparaison des technologies radio de communication IoT en fonction de leur débit/portée/consommation**

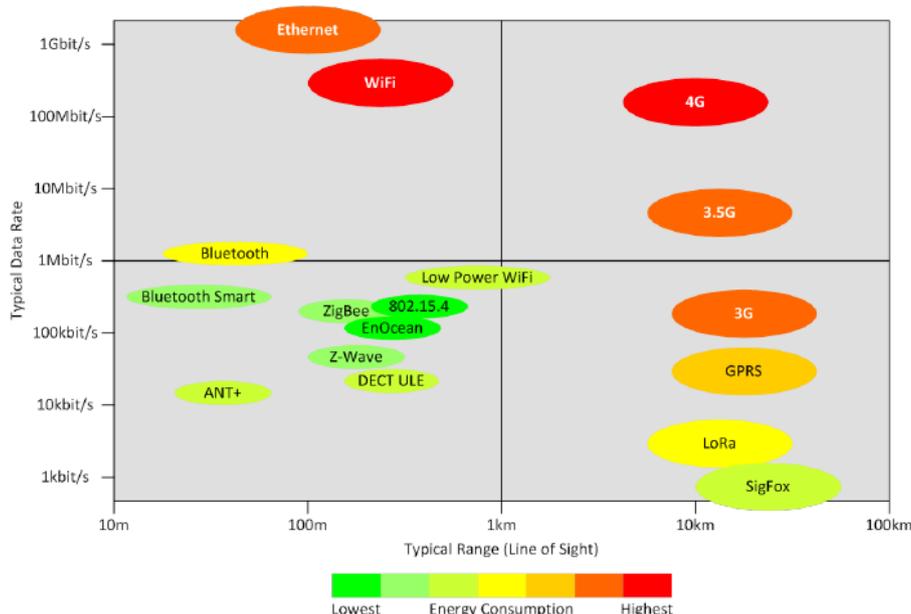


Note : l'ensemble des deux graphiques illustre les différentes caractéristiques de certaines technologies. Le graphique du haut illustre le positionnement des technologies en fonction de leur portée (abscisse) et de la durée de vie des batteries énergétiques (ordonnée) et le graphique du bas en fonction de leur portée (abscisse) et du débit disponible (ordonnée). L'étude combinée des deux graphiques montre, par exemple, que les technologies Sigfox et LoRa se caractérisent par une longue portée et un débit disponible faible (graphique du bas) et une durée de vie des batteries longue qui implique une consommation énergétique faible (graphique du haut).

Source : présentation d'Olivier Berder lors du séminaire France Stratégie

<sup>53</sup> Olivier Berder explique que la consommation de la partie communication est principalement générée par l'utilisation d'un amplificateur de puissance nécessaire pour que l'onde électromagnétique ne soit pas trop atténuée lorsqu'elle atteint la station de base.

**Graphique 19 – Représentation des technologies de communication de l’IoT en fonction de leur portée (en km), de leur débit (en bit/s) et de leur consommation**



Lecture : ce graphique place les technologies en fonction des trois paramètres de portée en m et km (abscisse), de débit disponible (ordonnée) et de consommation énergétique (échelle de couleur allant du vert pour les technologies les moins énergivores au rouge pour les plus énergivores). La 4G est par exemple une technologie qui se caractérise par une longue portée, des débits élevés et une consommation énergétique plus élevée.

Source : AIE (4E EDNA), *Energy efficiency of the internet of things*, 2016

Les graphiques 18 et 19 montrent que les diverses technologies utilisées sur le marché de l’internet des objets diffèrent en fonction de la portée de la communication, du débit des données et de la consommation énergétique.

Les technologies s’étendent du Wi-Fi qui diffuse des données sur une courte portée à des débits élevés, associé à une forte consommation énergétique, aux technologies LWPA (pour « Low Power Wide Area »), qui diffusent les informations sur une longue portée, à un faible débit, tout en optimisant la consommation énergétique.

Concernant les technologies LWPA, Olivier Berder précise que si les premières solutions ont été portées par des entreprises françaises comme LoRa (LoRaWAN) et Sigfox (SIGFOX), elles sont désormais concurrencées par des technologies développées par les équipementiers mobiles et notamment les technologies LTE Cat M et NB-IOT. Ces dernières sont encore marginales en France, mais seront vraisemblablement largement retenues à l’échelle mondiale par les grands opérateurs à terme. Il faut néanmoins comprendre que ces technologies sont complémentaires autant que concurrentes, et se partageront vraisemblablement des marchés distincts mais inégaux<sup>54</sup>.

Entre ces deux extrêmes, les technologies dites « cellulaires » (notamment GPRS, EDGE, 3G) sont également utilisées pour transmettre des informations sur une longue portée, alors que

<sup>54</sup> Présentation d’Olivier Berder lors du séminaire de France Stratégie, juin 2018.

les technologies BLE/Z-Wave et W-Mbus sont utilisées pour transmettre des informations sur la portée d'un immeuble, les technologies cellulaires à plus longue portée et plus grand débit.

Ainsi les technologies présentant les meilleurs débits (supérieurs à 10Mbit/s), telles que le Wi-Fi, la 3,5G ou la 4G, sont particulièrement énergivores. Les technologies moins énergivores font généralement le choix de sacrifier le débit (LoRaWAN, LTE Cat M, etc.) et/ou la portée (Bluetooth Smart, ZigBee, Z-wave).

On comprend donc que le choix d'une technologie n'est pas anodin en termes de consommation énergétique. **Par conséquent, pour optimiser la consommation énergétique d'un objet donné, le choix de la technologie devrait être fait en fonction de l'utilisation attendue d'un appareil connecté.**

**Tableau 9 – Analyse des technologies les plus adaptées pour certaines applications de l'internet des objets**

Domaine applicatif	Application	Equipement terminal	ANT+	Bluetooth	Bluetooth smart	DECT ULE	Z-Wave	Zig-Bee	802.15.4-2011 based	EnOcean	WiFi	Low Power WiFi	Ethernet	GPRS	3G (UMTS)	3,5G (HSPA)	4G (LTE)	LoRa	Sigfox
Maison intelligente	Eclairage intelligent	ampoules LED intelligentes	y	n	b	y	y	y	y	y	n	y	x	x	x	x	x	x	x
		passerelles applicatives	x	x	x	x	x	x	x	x	y	b	y	y	n	n	n	x	x
	Automatisation de la maison	capteurs	y	n	y	y	y	y	b	b	n	y	n	x	x	x	x	x	x
		actuateurs	y	n	y	y	y	y	b	b	n	y	n	x	x	x	x	x	x
		caméras	x	x	x	x	x	x	x	x	y	x	b	x	y	y	y	x	x
		passerelles applicatives	x	x	x	x	x	x	x	x	y	x	b	x	y	y	y	x	x
	Appareils intelligents	appareils intelligents	y	n	b	y	y	y	b	b	n	y	n	x	x	x	x	x	x
		passerelles applicatives	x	x	x	x	x	x	x	x	y	b	y	y	n	n	n	x	x
Mobilité intelligente	Route intelligente	unités en bordure de route	x	x	x	x	x	x	x	x	b	x	x	x	x	x	x	x	x
	Eclairage public intelligent	luminaires d'éclairage public	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	y	n	n	n	b	b

y	Technologie possible	b	Meilleure technologie disponible
n	Technologie non recommandée	x	Technologie inadaptee

Source : AIE (4E EDNA), *Energy efficiency of the internet of things*, 2016

Dans son rapport *Energy efficiency of the internet of things* publié en 2016, l'agence internationale de l'énergie (AIE) s'est notamment intéressée à cette question.

En prenant en compte l'utilisation attendue des fonctions communicantes de plusieurs types d'applications IoT et les caractéristiques (portée, débit, consommation) de chaque technologie, l'AIE identifie dans le tableau 9 les technologies les plus et les moins appropriées d'un point de vue énergétique pour chacune de ces applications. On voit ainsi, par exemple, que le Bluetooth Smart constitue la technologie de communication la plus adaptée d'un point de vue énergétique aux besoins des ampoules LED connectées et que le Wi-Fi n'est pas recommandé.

Dans l'idéal, les concepteurs de services connectés devraient donc suivre une logique similaire à celle utilisée par l'AIE pour choisir leur technologie communicante. Cependant, dans les faits, l'AIE note que le critère environnemental est loin d'être le seul critère retenu par les concepteurs : ils doivent prendre en compte des contraintes supplémentaires en termes de disponibilité d'une technologie donnée et/ou de son coût économique.

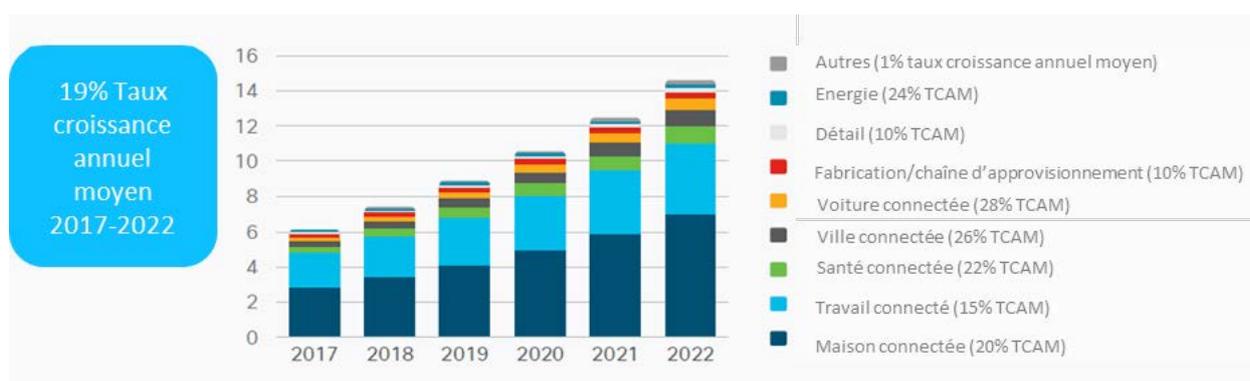
C'est notamment le cas du Wi-Fi, qui est la technologie la plus largement utilisée chez les clients résidentiels, et qui permet à un concepteur de s'assurer que son nouvel objet bénéficie de la plus faible barrière à l'entrée sur le segment Smart Home.

### Risques sur la consommation amont des objets connectés

L'explosion du nombre d'objets connectés pourrait alimenter la croissance de la consommation énergétique des infrastructures amont aux objets, c'est-à-dire les réseaux télécoms et les data centers, si elle génère une explosion du trafic sur internet.

Dans son étude mentionnée au chapitre 1, CISCO propose des projections sur l'internet des objets pour la période 2017-2022<sup>55</sup>.

**Graphique 20 – Projections de croissance mondiale des connexions M2M par industries sur la période 2017-2022 (en milliards de connexions)**



Source : Cisco VNI Global IP Traffic Forecast, 2017-2022

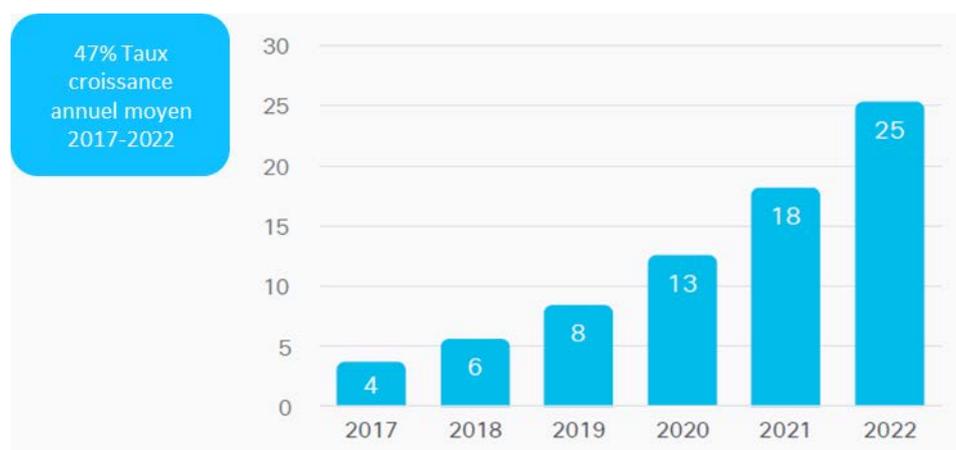
Selon l'entreprise, les connexions machine à machine (ou « M2M ») occupent une place de plus en plus importante sur internet, si bien qu'à l'échelle mondiale, le volume des connexions M2M devrait être multiplié par 2,4, passant de 6,1 milliards de connexions en 2017 à

<sup>55</sup> Cisco Visual Networking Index : Forecast and Trends, 2017-2022 White Paper.

14,6 milliards en 2022 (Graphique 20), et représenter plus de la moitié des connexions tous segments confondus (28,5 milliards au total).

Cinq sous-segments de l'IoT jouiront d'un taux de croissance annuel moyen des connexions supérieur ou égal à 20 % (jusqu'à 28 % pour les voitures connectées), dont le sous-segment de la maison connectée qui devrait représenter quasiment la moitié des connexions M2M d'ici 2022.

**Graphique 21 – Croissance du trafic mondial machine à machine (en exaoctets par mois)**

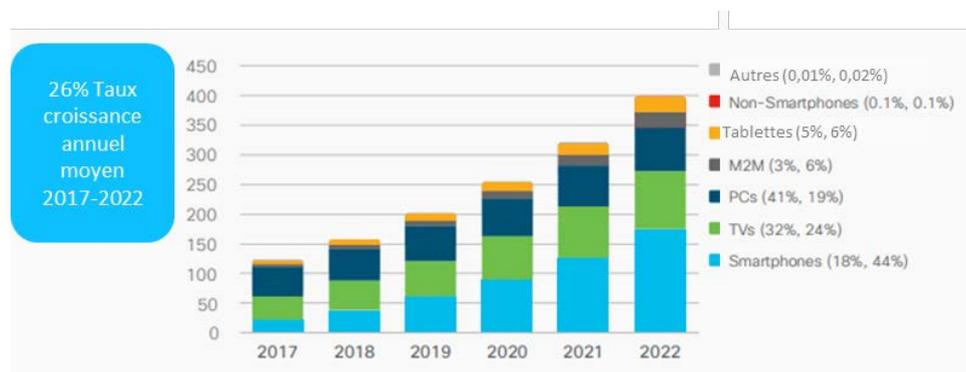


Source : Cisco VNI Global IP Traffic Forecast, 2017-2022

Le trafic IP généré par le segment M2M devrait également croître fortement sur la période : il sera multiplié par un peu moins de 7, passant de 3,7 exaoctets en 2017 à un peu plus de 25 exaoctets en 2022 (Graphique 21).

La croissance du trafic (x 7) est donc plus rapide que celle du volume de connexions (x 2,4). Cisco indique que ce phénomène de découplage s'explique par l'augmentation de la part des applications vidéo, qui sont plus exigeantes en bande passante, sur le segment M2M. Le trafic lié à la vidéo-surveillance, porté par la croissance de l'économie de la sécurité, devrait par exemple être multiplié par 15 d'ici 2022, et représenter 3 % du trafic vidéo mondial en 2022 (contre 2 % en 2017).

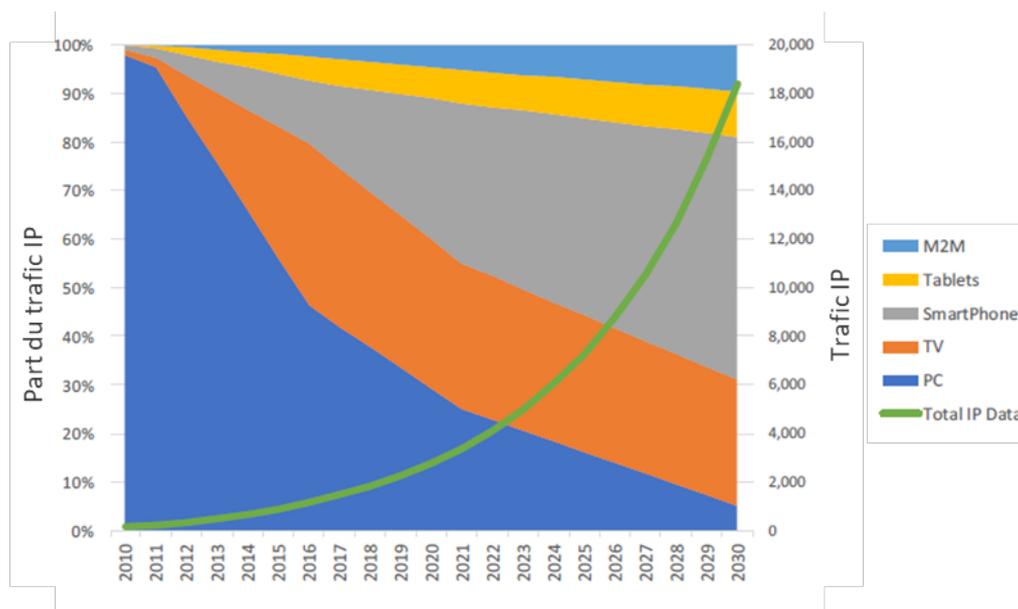
**Graphique 22 – Projections d'évolution du trafic IP mondial par catégorie d'équipements connectés entre 2017 et 2022 (en exaoctets par mois et en pourcentage du trafic total)**



Source : Cisco VNI Global IP Traffic Forecast, 2017-2022

Le graphique 22 montre que **malgré le très fort taux de croissance annuel attendu sur le segment M2M sur la période 2017-2022, le trafic qu'il génère ne devrait représenter que 6 % du trafic IP mondial en 2022 (contre 3 % en 2017)**. Les smartphones, les télévisions et les ordinateurs devraient continuer de générer l'essentiel du trafic IP mondial.

**Graphique 23 – Projections d'évolution du trafic IP mondial par catégorie d'équipements connectés et pour le trafic global entre 2017 et 2030 (en pourcentage du trafic total par catégorie et en exaoctets pour le trafic global)**



Source : AIE (4E EDNA), Total Energy Model for Connected Devices, 2019

Le graphique 23 de l'AIE conforte la tendance mise en lumière par Cisco : la part du segment M2M dans le trafic IP global devrait continuer à croître régulièrement jusqu'en 2030, pour atteindre environ 10 % du trafic IP global, soit plus que le segment des ordinateurs et autant que le segment des tablettes.

L'acheminement de ce trafic IP supplémentaire, même s'il reste encore limité, devrait se répercuter sur la consommation énergétique des réseaux télécoms.

Enfin, le traitement de la quantité de données issues de ces objets devrait également impliquer de nombreux calculs et nouveaux besoins en stockage et donc une charge supplémentaire pour les data centers, contribuant à tirer la consommation énergétique de ce dernier segment vers le haut.

L'optimisation de la consommation énergétique liée à l'internet des objets ne devrait donc pas se limiter aux équipements en tant que tels, mais devrait également amener les exploitants de services IoT à limiter la quantité de données transmises en amont de l'objet au strict nécessaire.

### **La consommation liée à la production des objets ou énergie grise**

L'autre versant de la consommation énergétique de l'internet des objets se trouve du côté de l'énergie grise. Concrètement, on ne dispose actuellement d'aucune source holistique à ce sujet, tant les objets connectés sont multiples et le sujet émergent.

À titre de comparaison, on peut en revanche rappeler que l'énergie grise d'un smartphone représente les trois quarts de l'énergie consommée de sa production à sa mort<sup>56</sup>. Bien que ce sujet soit encore prospectif en ce qui concerne l'IoT, on peut envisager un rapport démultiplié. Il conviendrait donc que des études soient lancées pour analyser le poids de l'énergie grise des principales catégories d'objets connectés. Avec le temps, il conviendra également de compléter ces études avec des données sur la durée moyenne d'utilisation de différentes catégories d'objets.

#### **2.2.4. Projections de la consommation globale du segment des objets connectés**

On a vu que la consommation énergétique liée au développement de l'internet des objets devrait être portée par trois composantes : la consommation en phase usage des objets, la consommation en phase usage des infrastructures amont et la consommation liée à la production des équipements.

Au-delà de ces explications, il est indispensable de compléter cette analyse par des données chiffrées sur la consommation énergétique de l'internet des objets. Or, à ce stade, il n'existe quasiment aucune évaluation globale de cette consommation.

Une modélisation dite « TEM » pour « Total Energy Model », susmentionnée dans la partie relative au nombre d'équipements connectés dans le monde, a cependant été publiée en 2019 par l'AIE<sup>57</sup>, qui s'intéresse depuis le milieu des années 2010 à la consommation énergétique liée au développement de l'internet des objets<sup>58</sup>.

Comme précédemment expliqué, lorsqu'on étudie les résultats d'une modélisation, il convient de regarder en détail le périmètre retenu par ses auteurs.

En l'espèce, l'AIE retient une définition large des objets connectés, qui ne se limite pas aux objets dits « IoT » mais englobe aussi les équipements terminaux traditionnels (ordinateurs, smartphones, tablettes et téléviseurs) ne relevant pas *stricto sensu* du nouveau segment de l'internet des objets, ainsi que les LAN (pour « local access network »), qui sont considérés par l'AIE comme les derniers équipements de la partie objets connectés avant le début du segment amont des réseaux.

Leur modélisation ne porte, par ailleurs, que sur la consommation liée à l'utilisation des objets connectés (phase usage) – consommation des objets et consommation des infrastructures amont – à l'exclusion donc de l'énergie nécessaire à leur production.

---

<sup>56</sup> ADEME, « Les impacts du smartphone », édition d'août 2018.

<sup>57</sup> AIE 4E EDNA, « Total Energy Model for Connected Devices » Lora (LoRaWAN), juin 2019.

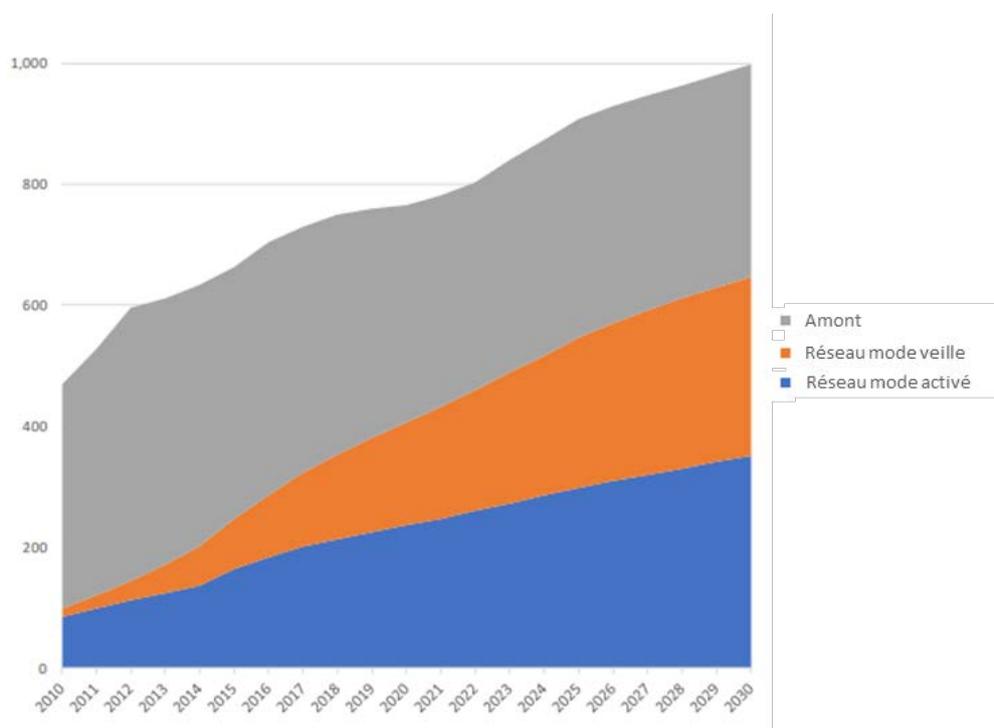
<sup>58</sup> On retiendra par exemple une première étude très spécifique réalisée en 2016 sur la consommation en mode veille de certaines catégories d'objets connectés branchés sur le secteur, <https://edna.iea-4e.org/tasks/task2>.

Concernant la consommation des objets connectés, l'AIE ne prend pas en compte l'énergie consommée par l'objet en tant que tel, mais seulement l'énergie liée à ses connexions : par exemple, elle ne prend pas en compte toute la consommation en phase usage d'un ordinateur ou d'un thermostat connecté, mais seulement celle dédiée à leurs fonctions de connexion (incluant les fonctions de connexion de l'objet terminal et le LAN).

L'énergie consommée par l'objet pour ses fonctions de connexion comprend elle-même deux sous-parties : la consommation en phase veille (ou consommation « network standby ») et la consommation en phase active (ou consommation « network active »).

Concernant la consommation amont (ou consommation « upstream »), l'AIE prend en compte la consommation énergétique liée à l'usage des objets connectés dans les réseaux télécoms et dans les data centers. Pour les besoins de cette étude, les LAN sont réputés ne pas générer de consommation amont, dans la mesure où l'AIE estime qu'ils ne produisent pas de données en propre.

**Graphique 24 – Estimations (jusqu'en 2017) et projections de consommation énergétique des équipements connectés selon la classification précédente entre 2010 et 2030 (en TWh)**



Source : AIE (4E EDNA), Total Energy Model for Connected Devices, 2019

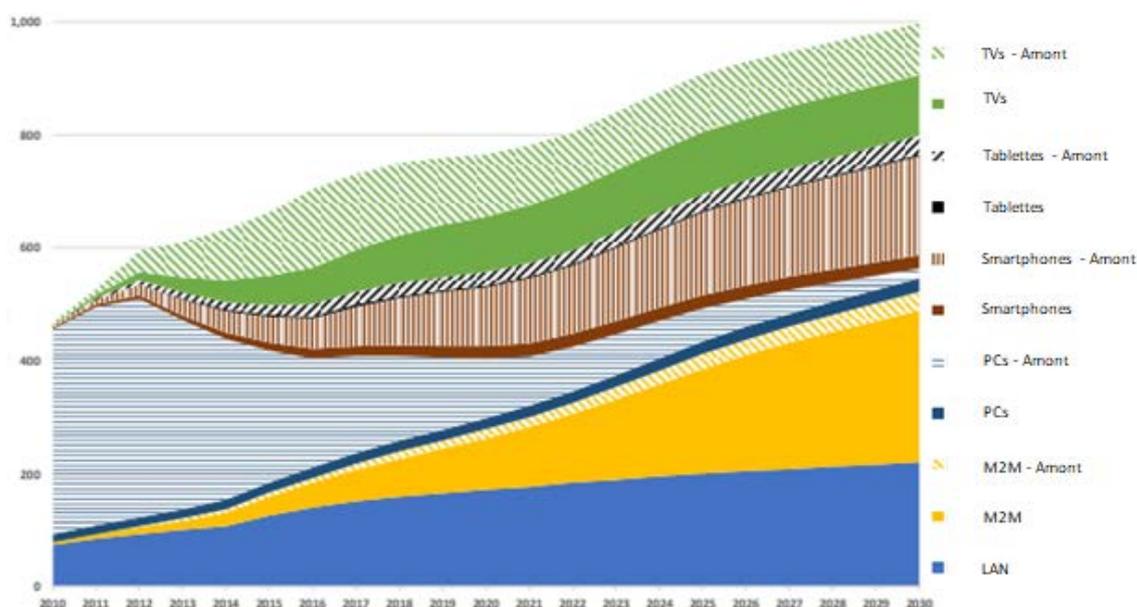
Le graphique 24 montre la consommation énergétique totale selon le périmètre retenu par l'AIE, en distinguant les trois catégories de consommations susmentionnées :

- la consommation « network standby » ou en mode veille, qui augmente rapidement sur la période avec l'addition de nouveaux objets connectés pour atteindre 300 TWh par an en 2030 ;
- la consommation « network active » ou en mode activé, qui croît également sur la période, pour atteindre 350 TWh par an en 2030 ;

- la consommation « upstream » ou amont qui croît jusqu'en 2012, puis décroît lentement pour atteindre 350 TWh par an en 2030.

L'autre information fournie par ce graphique – **une consommation totale des objets connectés évaluée à 1 000 TWh par an en 2030** – est intéressante mais impossible à comparer utilement avec les résultats de l'actualisation de la modélisation d'Andrae et Edler par le Shift Project tant les choix de modélisation (notamment le périmètre) de ces deux projets diffèrent.

**Graphique 25 – Estimations (jusqu'en 2017) et projections d'évolution de la consommation énergétique (en TWh/an) liée à l'utilisation des objets connectés par catégories d'équipements sur la période 2010-2030**



Lecture : les surfaces unies représentent la consommation des objets connectés et les surfaces rayées la consommation amont associée à la connexion des objets.

Source : AIE (4E EDNA), *Total Energy Model for Connected Devices*, 2019

Les autres résultats de l'étude de l'AIE permettent toutefois de tirer des conclusions qualitatives sur la consommation de l'internet des objets (Graphique 25).

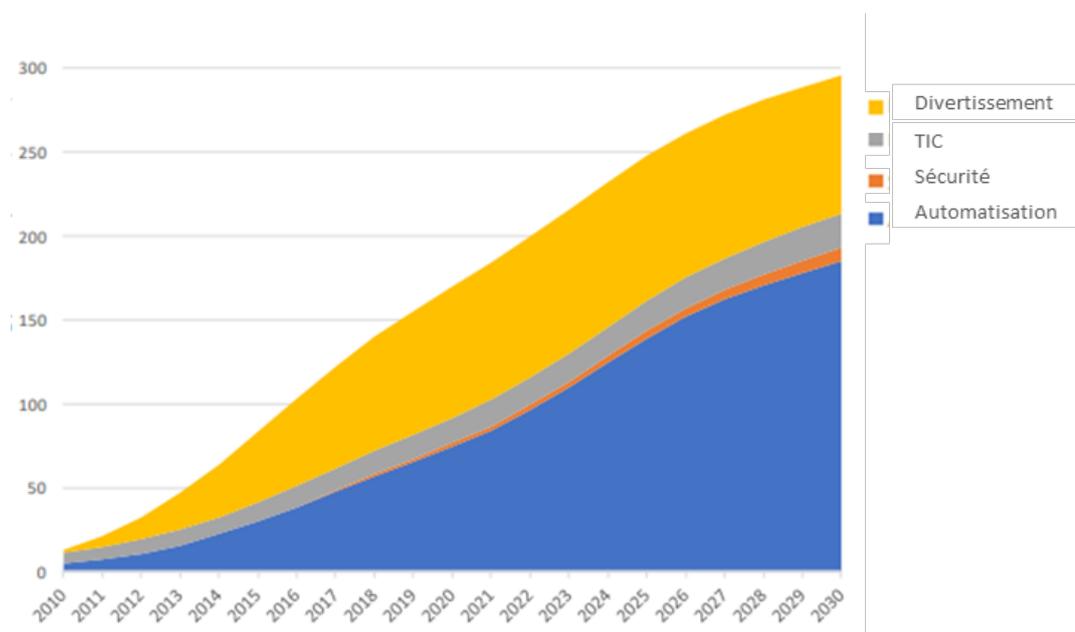
**La catégorie d'équipements dont la consommation croît le plus sur la période sont les équipements IoT ou M2M : cette croissance est essentiellement portée par la consommation liée aux fonctions de connexion des objets, tandis que la consommation amont reste faible** dans la mesure où leur utilisation ne génère qu'une faible quantité de données transférées aux réseaux et data centers.

La décomposition de la consommation est inversée pour les smartphones et tablettes, dont la consommation amont est très nettement supérieure à la consommation liée aux fonctions de connexion des objets, dans la mesure où les applications qu'ils permettent, telles que la vidéo, génèrent un trafic très important de données sur les infrastructures internet. Sur la période étudiée, la consommation amont des smartphones croît également fortement.

Toutes consommations confondues<sup>59</sup>, la consommation du segment M2M devrait être légèrement supérieure à la consommation cumulée des ordinateurs, smartphones et tablettes en 2030.

On note par ailleurs que la consommation des équipements LAN croît nettement sur la période étudiée, passant de 75 TWh par an en 2010 à 220 TWh par an en 2030. Une partie de cette consommation sera générée par les systèmes d'objets M2M qui dépendent dans une grande mesure de ces équipements pour se connecter au réseau télécoms amont.

**Graphique 26 – Projections de consommation en mode veille par catégories d'équipements sur la période 2010-2030 (en TWh par an)**



Source : AIE (4E EDNA), Total Energy Model for Connected Devices, 2019

Le graphique 26 de l'AIE, qui détaille le segment de la consommation en mode veille des équipements connectés, montre que la catégorie Automatisation qui relève des objets IoT à proprement parler portera l'essentiel de la croissance de ce segment<sup>60</sup>. La seconde catégorie en termes de consommation en mode veille en 2030 est la catégorie « Entertainment » qui regroupe des équipements connectés « traditionnels » tels que les télévisions et consoles de jeux.

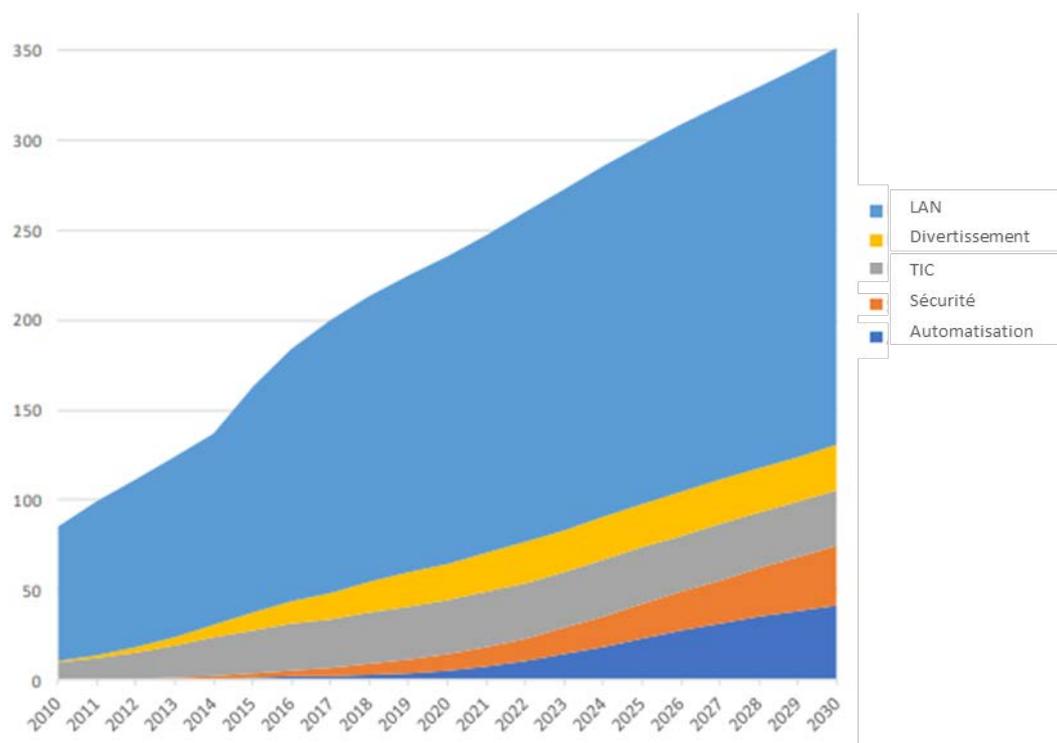
**Concernant la consommation en mode veille**, qui devrait passer de 64 TWh par an en 2014 (soit 0,3 % du total de la demande en électricité selon leurs calculs) à 300 TWh par an en 2030 (soit 1 % du total de la demande en électricité), **l'AIE recommande aux institutions européennes de réviser la directive Ecoconception de 2013** : si la problématique de la consommation en mode veille des équipements numériques existe déjà, notamment pour les box et décodeurs TV, **le problème va s'amplifier à l'avenir avec la croissance exponentielle du nombre d'objets connectés à internet** et plus particulièrement de certains

<sup>59</sup> Consommation des fonctions de connexion de l'objet et consommation amont.

<sup>60</sup> Pour connaître le détail de la consommation de chaque groupe de la catégorie Automatisation, voir la figure 19 de l'étude de l'AIE, p. 34.

objets M2M, tels que ceux connectés en Wi-Fi et les équipements intégrant des assistants vocaux, ainsi que certains équipements médias (notamment les lecteurs « Over The Top » ou « OTT »).

**Graphique 27 – Projections de consommation énergétique en mode activé par catégories d'équipements sur la période 2010-2030 (en TWh par an)**



Source : AIE (4E EDNA), Total Energy Model for Connected Devices, 2019

Le graphique 27 de l'AIE, qui détaille le segment de la consommation en mode activé des équipements connectés, montre que les équipements LAN porteront l'essentiel de la croissance de ce segment : ils représentent 75 % de la consommation de ce segment en 2018 et toujours 62 % en 2030. L'AIE explique que la consommation des équipements LAN augmente en partie à cause de la croissance du nombre de connexions à internet assurées par ces équipements (notamment pour les systèmes d'objets connectés M2M ou IoT).

### 2.3. Conclusion

Les développements *supra* mettent en exergue le manque d'études sur la consommation énergétique globale de l'internet des objets, qui s'explique en grande partie par le caractère émergent de ces applications. Et quand il y en a, ces études ne retiennent pas un périmètre permettant de comparer les résultats quantitatifs obtenus avec ceux d'autres études sur la consommation totale du numérique. On regrettera par ailleurs l'absence d'études sur la consommation énergétique liée à la production des équipements connectés IoT ou M2M, alors même que l'énergie grise représente souvent une large part de la consommation des petits équipements numériques.

On peut cependant tirer certaines conclusions de l'étude publiée en 2019 par l'AIE et notamment le fait, d'une part, que les équipements IoT ou M2M constitueront à horizon 2030

la catégorie d'équipements dont la consommation devrait croître le plus, d'autre part, que cette croissance est essentiellement portée par la consommation liée aux fonctions de connexion des objets, tandis que la consommation amont reste faible.

Au final, si l'adjonction d'une fonction de connexion à de nombreux objets devrait sûrement permettre d'optimiser la consommation énergétique desdits objets ou infrastructures, la consommation induite par cette nouvelle fonctionnalité n'est pas sans incidence sur l'évolution de la consommation totale du numérique et devrait, en conséquence, être étudiée.

## Chapitre 3

# Insuffisance du progrès technologique pour maîtriser la consommation énergétique du numérique

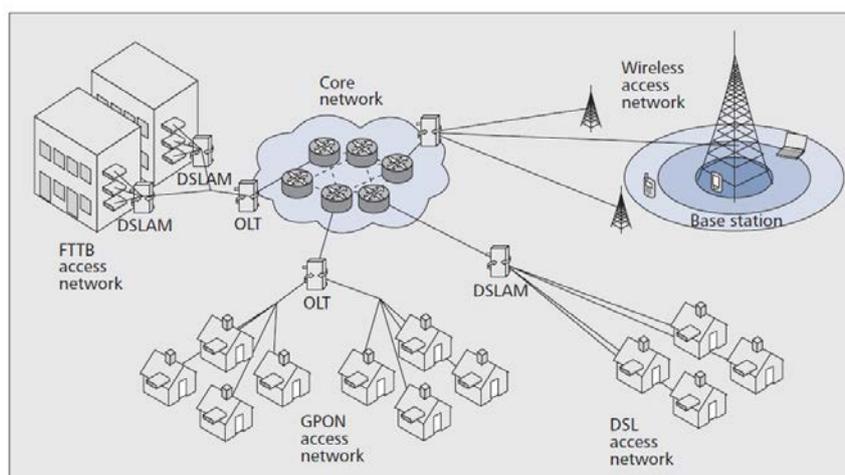
La réponse traditionnelle aux problèmes liés à la consommation énergétique croissante du numérique a reposé et repose encore essentiellement sur les gains énergétiques liés au progrès technologique. Or, si le progrès technologique dans les grandes infrastructures numériques – réseaux télécoms et data centers – permet de réels gains énergétiques unitaires, les inefficacités qui perdurent dans la gestion des infrastructures et surtout les effets indirects du progrès sur les usages et *in fine* sur le trafic internet ne permettent pas de maîtriser la consommation globale.

## 1. Comprendre l'impact du progrès technologique dans la consommation des réseaux de télécommunications

### 1.1. Fonctionnement des réseaux télécoms

Les réseaux de télécommunications se décomposent en plusieurs parties, ici présentées de la plus proche du client final à la plus éloignée : les réseaux d'accès (à l'échelle d'une ou plusieurs communes), les réseaux de collecte (régionaux) et les cœurs de réseaux (nationaux).

Figure 8 – Représentation des réseaux télécoms



Source : Vereecken et autres, 2011

### 1.1.1. Les réseaux d'accès ou boucles locales

Concrètement, pour accéder à internet, les équipements terminaux des clients finaux se connectent à des réseaux d'accès. Ces réseaux peuvent être de deux types : fixes ou mobiles.

Concernant les réseaux fixes, les équipements terminaux se connectent grâce à des câbles Ethernet ou au Wi-Fi à un premier niveau d'équipement, à savoir la box fournie par leur fournisseur d'accès internet (FAI). Cette box ou plus généralement CPE (pour « customer premises equipment ») contient un routeur Wi-Fi pour la connectivité au sein du local ou du logement, ainsi qu'un modem, qui va permettre au FAI de gérer les flux en provenance et à destination de l'équipement terminal. Cette box est interconnectée au réseau d'accès du FAI, qui peut être, en fonction des raccordements disponibles, un réseau avec terminaison en cuivre (technologies xDSL de type ADSL ou VDSL), un réseau en fibre optique (technologie FttH) ou un réseau en câble coaxial (conçu historiquement pour la diffusion des programmes des chaînes de télévision, le réseau en câble coaxial permet désormais la transmission des flux de données internet grâce aux technologies DOCSIS). Ces différents liens physiques raccordent la box du client à un premier nœud du réseau situé plus en amont qui va router le trafic : le DSLAM dans les réseaux xDSL, l'OLT dans les réseaux FttH et le CMTS dans les réseaux coaxiaux.

Concernant les réseaux mobiles, les téléphones mobiles se connectent directement aux antennes et stations de base installées sur des sites mobiles environnants au moyen de fréquences dédiées aux différentes technologies mobiles (2G, 3G, 4G et demain la 5G). Le site mobile constitue le premier nœud du réseau mobile. La station de base communique également en amont du réseau avec les réseaux de collecte.

### 1.1.2. Les réseaux de collecte et les cœurs de réseaux

Les réseaux de collecte relient les différents nœuds de réseaux d'accès fixes et mobiles entre eux et récupèrent l'ensemble des flux. Ces flux remontent ensuite au niveau national ou international en passant par les cœurs de réseaux.

Les réseaux de collecte et les cœurs de réseaux sont constitués de liens physiques, principalement en fibre optique, et de routeurs disposant de capacités supérieures à celles des réseaux d'accès pour gérer le trafic agrégé.

On retiendra que, tels des ruisseaux, les flux de données issus des équipements terminaux de chaque utilisateur s'écoulent depuis chaque local pour se déverser dans des rivières – les réseaux de collecte – qui elles-mêmes se jettent dans la mer que représente le cœur de réseau.

La consommation énergétique des réseaux télécoms représente donc la somme de la consommation des équipements composants les réseaux d'accès, de collecte et les cœurs de réseaux, à laquelle on ajoute des consommations complémentaires comme celle des systèmes de refroidissement de certaines infrastructures.

## 1.2. Comprendre la consommation énergétique des réseaux

### 1.2.1. L'exploitation des réseaux télécoms, principal poste de consommation énergétique des opérateurs

Dans une étude top-down réalisée à partir des données obtenues auprès d'un échantillon d'opérateurs représentatifs dans le monde, Sofie Lambert *et al.*<sup>61</sup> se sont attachés à comprendre les grandes tendances de consommation des réseaux de télécommunications.

Selon leurs résultats, en moyenne 76 % de l'électricité consommée par les opérateurs télécoms est consacrée à l'exploitation de leurs réseaux, le reste étant réparti entre leurs bureaux et activités de détail (13 %) et leurs data centers internes (11 %). Ces ordres de grandeur sont confirmés par une autre étude top-down publiée par Jens Malmodin et Dag Lunden en 2018<sup>62</sup>. En se fondant sur des données d'opérateurs plus récentes (2015), ces derniers trouvent une répartition de la consommation électrique des opérateurs de 80 %, 11 % et 9 % pour les trois mêmes postes.

### 1.2.2. L'accès, principal poste de la consommation énergétique des réseaux

Comme expliqué *supra*, au sein des réseaux des opérateurs, la consommation énergétique se répartit entre les réseaux d'accès, les réseaux de collecte et les cœurs de réseaux.

Lors du séminaire organisé par France Stratégie le 13 mars 2018, Azeddine Gati d'Orange Labs a indiqué que l'accès représente 70 % de la consommation énergétique des réseaux d'Orange. Les 30 % restant se répartissant entre le réseau de collecte et le cœur de réseau (environ 20 %) et ses data centers (environ 10 %).

L'Arcep relève également<sup>63</sup> qu'en 2017, 80 % de la consommation énergétique du réseau de Free provient de ses réseaux d'accès.

Ces chiffres confirment une tendance décrite par la communauté scientifique selon laquelle **l'accès concentre actuellement la très grande majorité de la consommation énergétique des réseaux télécoms.**

Qui plus est, au sein de cet accès, Azeddine Gati précise que 70 % de la consommation énergétique est imputable aux réseaux mobiles. **Les réseaux d'accès mobiles représentent donc le principal poste de la consommation énergétique des réseaux télécoms.**

## 1.3. L'incitation économique croissante des opérateurs à optimiser la consommation énergétique de leurs réseaux

La consommation énergétique des réseaux télécoms représente une part importante des coûts opérationnels des opérateurs : entre 20 % et 40 % des OPEX des réseaux mobiles selon

---

<sup>61</sup> « Worldwide electricity consumption of communication networks », Sofie Lambert, Ward Van Heddeghem, Willem Vereecken, Bart Lannoo, Didier Colle, et Maria Pickavet, 4 décembre 2012.

<sup>62</sup> « The electricity consumption and operational carbon emissions of ICT networks operators », Jens Malmodin et Dag Lunden du KTH Centre for Sustainable Communications, 2018.

<sup>63</sup> Réseaux du Futur, L'empreinte carbone du numérique, 2019, Arcep.

la GSMA<sup>64</sup>. À titre d'illustration, l'Arcep estime que la facture énergétique des opérateurs télécoms français varie « de quelques dizaines à plusieurs centaines de millions d'euros en fonction de leur taille et du prix d'achat de l'électricité »<sup>65</sup>.

**Bien que les opérateurs aient toujours eu une incitation économique à réduire leur facture énergétique en investissant dans des technologies plus efficaces, la pression a augmenté ces dernières années sous l'effet cumulé, d'une part, de la mise en place de politiques publiques visant à limiter les émissions de gaz à effet de serre, d'autre part, de la stagnation des revenus télécoms en Europe et de l'augmentation tendancielle des prix de l'électricité<sup>66</sup>.**

Comme l'explique l'Arcep, afin d'optimiser leur consommation énergétique, les opérateurs répercutent cette contrainte sur les équipementiers qui « ont intégré cette exigence et cherchent à se démarquer en offrant des équipements optimisés ».

Pour répondre à cette demande, chaque nouvelle génération d'équipement télécom devrait donc consommer moins. Ce postulat sera confronté à la réalité dans les développements suivants.

#### 1.4. Des nouvelles générations de réseaux à l'efficacité énergétique renforcée

Les évaluations bottom-up constituent une excellente source d'information pour comprendre en détail la consommation énergétique propre à chaque partie d'un réseau télécoms et comparer les différentes technologies entre elles.

Dans leur étude de 2011<sup>67</sup>, Willem Vereecken *et al.* ont, d'une part, décrit les propriétés de consommation des différentes technologies d'accès fixes et mobiles, ainsi que des segments amont, d'autre part, proposé une estimation de la consommation de chacune de ces technologies en Watt par utilisateur.

##### 1.4.1. Faible poids des cœurs de réseau et réseaux de collecte dans la consommation totale

L'étude de Vereecken *et al.* propose une analyse de la consommation des cœurs de réseau et réseaux de collecte. Les auteurs expliquent que ces deux segments sont constitués de « liens » (liens WDM, avec utilisation d'amplificateurs) et de « nœuds » (ici, des routeurs) responsables respectivement de 10 % de la consommation énergétique pour les liens et 90 % pour les nœuds.

---

<sup>64</sup> [www.gsma.com/futurenetworks/wiki/energy-efficiency-2](http://www.gsma.com/futurenetworks/wiki/energy-efficiency-2).

<sup>65</sup> Réseaux du futur : l'empreinte carbone du numérique, Arcep, 2019.

<sup>66</sup> En France, on regardera notamment l'étude de l'Insee « Les dépenses des Français en électricité depuis 1960 », publiée le 4 avril 2019. À l'échelle européenne, on se référera aux statistiques publiées par Eurostats.

<sup>67</sup> « Power Consumption in Telecommunication Networks: Overview and Reduction Strategies », *IEEE Communications Magazine*, juillet 2011.

La consommation de ces deux segments de réseaux étant proportionnelle au trafic, l'unité de consommation énergétique des cœurs de réseaux et des réseaux de collecte est couramment exprimée en Watts par bit transféré.

En 2011, les routeurs consommaient entre 0,1 et 0,01 W/Mb/s<sup>68</sup>. En retenant une consommation moyenne des routeurs de 0,05 W/Mb/s, les auteurs obtiennent les consommations moyennes par abonné suivantes :

- pour un débit de 8 Mb/s : 0,24 W par abonné ;
- pour un débit de 100 Mb/s : 3 W par abonné.

Ces consommations sont relativement basses, comme expliqué *infra*, si on les compare à celles des réseaux d'accès, et plus particulièrement à celles des réseaux mobiles. Pour autant, les auteurs indiquent que l'augmentation du trafic sur les réseaux d'accès avec l'adoption des nouvelles technologies, et tout particulièrement des technologies d'accès FttH, entraînera logiquement une hausse de la consommation sur les cœurs de réseaux, proportionnelle au volume de données à traiter. La part des cœurs de réseaux dans la consommation totale des télécoms est donc amenée à croître.

Des travaux plus récents tablent cependant sur une amélioration continue de l'intensité énergétique des cœurs de réseaux grâce au progrès technologique – selon Joshua Aslan, entre 2000 et 2015, leur intensité énergétique<sup>69</sup> a été divisée par deux tous les deux ans – qui pourrait contenir partiellement la croissance de ce segment.

#### 1.4.2. Optimisation énergétique des technologies d'accès mobiles

Concernant l'accès mobile, différentes générations de technologies mobiles se sont succédé. On trouve encore en activité en France et dans la majorité des pays les technologies 2G, 3G, et 4G.

Le facteur déterminant dans la consommation énergétique des réseaux d'accès mobiles est la zone couverte par un site mobile. En effet, la principale source de consommation est la station de base, qui génère des ondes radio diffusant le signal. La consommation par utilisateur est proportionnelle à la densité d'utilisateurs dans la zone de couverture de la station à un instant donné. Réciproquement, l'efficacité énergétique d'une station de base repose sur la densité d'utilisateurs de la zone couverte par son signal.

Si l'on compare les deux dernières générations de réseaux mobiles actuellement déployées, l'étude de Vereecken *et al.* propose les chiffres suivants pour la consommation énergétique totale d'une station de base :

- 3G+ : 3,7 kW/station de base ; portée de signal de 240 mètres ;
- 4G : 3,7 kW/station de base ; portée de signal de 470 mètres.

---

<sup>68</sup> L'efficacité énergétique des routeurs progressant rapidement, les chiffres indiqués par les auteurs de l'étude sont probablement supérieurs à ceux des routeurs actuellement utilisés dans les réseaux.

<sup>69</sup> « Electricity Intensity of Internet Data Transmission. Untangling the Estimates », 2017.

**Tableau 10 – Propriétés des différentes technologies des réseaux d'accès mobiles**

Technologie	Portée (km)	Débit descendant (Mb/s)	Utilisateurs simultanés par nœud	Densité minimale d'utilisateurs (abonnés/km <sup>2</sup> )	Énergie par utilisateur (W/abonné)
3G+	0,240 (3 Mb/sec)	1 - 14	225	N/A	68 (pour 300 abonnés au km <sup>2</sup> )
4G	0,470 (3 Mb/sec)	1 - 300	180	N/A	18 (pour 300 abonnés au km <sup>2</sup> )

Source : Vereecken, 2011

Si les deux technologies ont la même consommation unitaire par station de base, la 4G offre une portée de signal quasiment deux fois supérieure à celle de la 3G+. En admettant que tous les utilisateurs ont le même usage de ces réseaux, pour une densité de population de 300 utilisateurs/km<sup>2</sup><sup>70</sup>, Vereecken *et al.* indiquent que la technologie 4G consomme 18W/utilisateur, contre 68 pour la 3G+ (Tableau 10).

Ces chiffres sont directement liés à la densité d'utilisateurs : aussi si celle-ci est divisée par deux, la consommation par utilisateur double mécaniquement, toutes choses restant égales par ailleurs. L'essentiel est donc le ratio consommation de la station de base/population.

Quoi qu'il en soit, la portée supérieure de la 4G lui donne un avantage en matière de consommation énergétique.

Au-delà de la 4G, les regards se tournent désormais vers la future génération de réseaux mobiles : la 5G. Or si la consommation énergétique nominale de la 5G par unité de trafic (exprimée en Watt par bit) devrait être largement optimisée, la consommation globale de la 5G dans les faits devrait être bien supérieure à celle de la 4G<sup>71</sup>. Les raisons d'une telle explosion seront expliquées dans la partie portant sur les effets rebonds.

### 1.4.3. Optimisation énergétique des technologies d'accès fixes

Concernant les accès fixes, l'étude de Vereecken *et al.* retient deux technologies principales : DSL et FttH. Quelle que soit la technologie, on peut tirer plusieurs enseignements généraux de ces travaux.

D'un côté, le trafic dans les réseaux d'accès est très variable dans le temps et « en rafale ». Autrement dit, selon l'heure, les connexions sont plus ou moins nombreuses, avec des heures de pointe et des heures de faible fréquentation. D'un autre côté, les équipements utilisés dans

<sup>70</sup> En France, la densité moyenne de population est de 117 habitants/km<sup>2</sup>, cette densité atteignant environ 1 000 habitants/km<sup>2</sup> en région Île-de-France d'après l'Insee en 2015. Une densité de 300 habitants/km<sup>2</sup> correspond approximativement à la densité d'une ville comme Cahors.

<sup>71</sup> 5G-era mobile network cost evolution, GSMA, 2019 ; 5G power whitepaper, Huawei, 2019.

les réseaux d'accès fixe ont une consommation énergétique largement constante dans le temps et donc indépendante du trafic.

Chaque abonné disposant d'une connexion dédiée, on retient la consommation des réseaux d'accès par abonné comme métrique. Ainsi, si on compare la consommation d'énergie des différentes technologies d'accès – les auteurs ont étudié la consommation des technologies sur support cuivre et fibre optique, à l'exclusion des technologies sur câble coaxial –, l'étude propose les chiffres suivants :

- ADSL : les équipements ADSL consommaient 1-2 W/utilisateur en 2011 ;
- VDSL<sup>72</sup> : les équipements VDSL consommaient 3-5 W/utilisateur en 2011 ;
- PON<sup>73</sup> (fibre optique) : les équipements consomment 10-20 W par port. Avec une architecture GPON<sup>74</sup>, l'équipement actif dit « OLT » consomme entre 0.2 et 0.8 W/abonné en 2011<sup>75</sup>.

En prenant en compte l'énergie nécessaire au refroidissement des locaux et les dispositifs d'alimentation de secours en cas de coupures de courant, les chercheurs estiment que tous ces chiffres doivent être multipliés par deux :

- ADSL : les équipements ADSL consommaient 2-4 W/utilisateur en 2011 ;
- VDSL : les équipements VDSL consommaient 6-10 W/utilisateur en 2011 ;
- PON (fibre optique) : les équipements consomment 20-40 W par port. Avec une architecture GPON, l'OLT consomme entre 0,4 et 1,6 W/utilisateur en 2011.

Même en retenant une publication reposant sur des données relativement anciennes (2011), il est indéniable que les nouvelles technologies d'accès fixe reposant sur la fibre optique constituent une avancée majeure en termes de consommation énergétique unitaire. En France, la transition en cours des réseaux en cuivre vers la fibre optique semble donc a priori une bonne nouvelle puisque les technologies d'accès FttH GPON – architecture retenue en France – consomment moins que les technologies DSL.

#### 1.4.4. L'angle mort de l'optimisation des réseaux d'accès fixe : les box des utilisateurs

Comme expliqué *supra*, le dernier équipement de la boucle locale d'accès fixe – le CPE – se situe chez l'abonné. L'externalisation de cet équipement de réseau chez l'abonné ne doit pas amener à en ignorer la consommation, au contraire. En effet, dans leur étude de 2011, Vereecken *et al.* estiment que la consommation unitaire des CPE est comprise entre 5 et 10 W, soit une consommation par utilisateur supérieure ou égale à celle du reste du réseau d'accès fixe.

Ils précisent que la consommation des CPE dépend de leur raccordement. Ainsi, les box raccordées en fibre optique ont une consommation électrique supérieure à celles connectées

---

<sup>72</sup> Le VDSL, pour « Very high bit rate digital subscriber line », est une technologie de type xDSL.

<sup>73</sup> Le PON est une architecture FttH utilisant un système de couplage passif.

<sup>74</sup> Le GPON, pour « Gigabit Passive Optical Network » est une forme de protocole normalisé pour le PON.

<sup>75</sup> D'après les recommandations de la mission France THD, chaque port permettant de raccorder jusqu'à 64 abonnés dans un réseau GPON.

en DSL, ce qui, selon eux, pourrait réduire les bénéfices énergétiques du passage à la fibre optique.

**Tableau 11 – Consommation électrique moyenne des CPE (box d'accès internet)**

	<b>Puissance par utilisateur (W)</b>
Câble coaxial	9,5
DSL	7,1
FTTH	13
Autre accès haut débit <sup>76</sup>	8,3
Narrowband (dial-up) <sup>77</sup>	2,5

Source : *Sofie Lambert, 2012*

Dans son étude top-down, *Sofie Lambert*<sup>78</sup> parvient à un ordre de grandeur similaire, avec des consommations pour les technologies les plus utilisées de nos jours se situant entre 7 W pour les box DSL et 13 W pour les box FttH (Tableau 11)<sup>79</sup>.

En Europe, le sujet est connu des pouvoirs publics, mais aucune norme visant à limiter la consommation énergétique des CPE n'a été mise en place. En effet, la directive sur l'écoconception de 2008 qui instaure des limites contraignantes de consommation pour le mode veille de nombreux appareils électriques et électroniques (lave-linge, téléviseur, etc.) ne s'applique pas aux CPE.

À la place, la Commission européenne a privilégié des engagements volontaires des équipementiers et opérateurs télécoms sous la forme d'un code de conduite<sup>80</sup>.

On peut cependant s'interroger sur le caractère suffisant d'une telle mesure. En effet, les essais techniques réalisés en France par l'Institut national de la consommation (INC) avec l'appui de l'ADEME, et publiés dans le magazine *60 millions de consommateurs* en juin 2018<sup>81</sup>, révèlent que la consommation des box (indépendamment du récepteur TV) en mode veille est quasiment équivalente à celle en utilisation. L'INC note par ailleurs que la consommation en mode veille n'a pas diminué par rapport aux études réalisées en 2007 et 2008 : elle se situe toujours entre 9 W et 10 W pour la majorité des box, et peut atteindre 20 W pour les plus énergivores.

<sup>76</sup> Réseaux satellitaires et réseaux de boucle locale radio.

<sup>77</sup> Ou accès à internet par ligne commutée, qui était au début des années 2000 la principale méthode d'accès à internet en France.

<sup>78</sup> « Worldwide electricity consumption of communication networks », *Sofie Lambert, Ward Van Heddeghem, Willem Vereecken, Bart Lannoo, Didier Colle et Maria Pickavet*, 4 décembre 2012.

<sup>79</sup> L'auteur précise cependant que ces chiffres de puissance par utilisateur sont une extrapolation de données recueillies aux États-Unis, lesquelles reposent sur des moyennes entre plusieurs sous-technologies (ADSL-VDSL) regroupées dans une seule catégorie dans le tableau 11. Rien ne dit que la part respective des sous-technologies dans chaque agrégat aux États-Unis soit extrapolable à l'échelle du monde.

<sup>80</sup> Code of Conducts for Broadband Communication Equipment, dont la [dernière version est disponible en ligne](#).

<sup>81</sup> « Essai comparatif. Test de consommation électrique », *60 millions de consommateurs*, 15 juin 2018.

L'INC note toutefois que la majorité des box disposent désormais d'un interrupteur, ce qui n'était pas le cas dix ans auparavant. Pour autant, 43 % des sondés (panel de 1 106 lecteurs du magazine) indiquent ne jamais éteindre leur box, et 41 % l'éteignent uniquement en cas d'absence prolongée.

Les box sont donc les grands oubliées de l'effort d'optimisation de la consommation énergétique des réseaux d'accès fixes. On touche ici aux limites de l'incitation des opérateurs à utiliser des technologies efficaces : les box étant branchées chez les abonnés, les opérateurs n'en assument pas les coûts énergétiques et n'ont pas d'intérêt économique à réduire leur consommation.

Le choix des institutions européennes de privilégier une responsabilisation des équipementiers et opérateurs télécoms par une politique d'engagements volontaires à la mise en place d'une régulation contraignante de la consommation énergétique des CPE semble également atteindre ses limites.

Pour obtenir une évolution réelle de la consommation des CPE, l'imposition de normes contraignantes sur la consommation en mode veille, à l'image de ce qui peut être fait pour d'autres équipements électroniques, devrait donc être envisagée.

#### 1.4.5. Conclusion

On constate que, tant pour les réseaux fixes que pour les réseaux mobiles, le progrès technologique va dans le sens d'une réduction de la consommation énergétique unitaire des infrastructures télécoms. Le passage progressif à la fibre optique et à la 4G semble donc a priori une bonne nouvelle en termes de consommation énergétique.

Mais alors, si les nouvelles technologies télécoms sont plus efficaces, pourquoi la consommation des réseaux télécoms ne diminue-t-elle pas ?

Comme expliqué *supra*, l'étude détaillée de la consommation unitaire des technologies d'accès confirme l'écart majeur de consommation entre les technologies d'accès fixes (entre 0,4 W et 1,6 W par abonné pour le FttH) et mobiles (18 W par abonné 4G pour une zone arrière de 300 habitants/km<sup>2</sup>). L'utilisation croissante des réseaux mobiles comme mode de connexion n'est donc pas sans incidence sur l'évolution de la consommation énergétique des réseaux télécoms.

Il convient par ailleurs de rappeler que, dans les réseaux d'accès fixes, l'essentiel de la consommation est porté par les box dont la consommation énergétique est externalisée aux utilisateurs et pour lesquelles les opérateurs n'ont pas d'incitation économique à optimiser l'efficacité énergétique.

Au-delà de ces premiers éléments de réponse, on verra que l'amélioration de l'efficacité énergétique des technologies télécoms successives doit être interprétée en tenant compte, d'une part, des limites opérationnelles liées au déploiement des nouvelles technologies, d'autre part, aux divers effets rebonds engendrés par ces nouvelles technologies.

## 1.5. Limites opérationnelles à la maîtrise de la consommation par le progrès technologique

### 1.5.1. Première limite : le temps de déploiement des nouvelles technologies

La difficulté concernant l'optimisation de l'efficacité énergétique des réseaux télécoms est qu'il existe un laps de temps, qui peut varier énormément en fonction des acteurs, entre le moment où une nouvelle technologie moins énergivore est développée et celui où elle est effectivement déployée dans les réseaux.

En effet, le déploiement massif de nouveaux équipements de réseaux requiert, d'une part, d'importants CAPEX, qui sont mobilisés progressivement dans le temps, d'autre part, la disponibilité d'une main-d'œuvre qualifiée suffisante pour déployer sur plusieurs territoires en même temps.

Ce phénomène est observable dans le cas du remplacement du réseau de cuivre par les réseaux de fibre optique en France. Le déploiement des premiers réseaux FttH a débuté en France au début des années 2010. La couverture de l'ensemble du territoire national par ce nouveau réseau d'accès repose sur un partage des investissements entre, d'un côté, les opérateurs privés dans les zones très denses et certaines zones moins denses rentables, de l'autre côté, les collectivités territoriales (avec l'appui financier de l'État) dans le reste des zones moins denses. Ce partage est formalisé dans le cadre du *Plan France Très Haut Débit* lancé par le gouvernement en 2013. L'objectif annoncé de ce plan est de couvrir l'ensemble du territoire français en très haut débit d'ici 2022, dont 80 % en FttH.

On voit avec l'exemple du déploiement des nouvelles boucles locales FttH que la diffusion sur l'ensemble d'un territoire national des nouvelles technologies fixes sur le segment de l'accès, qui est très capillaire, demande du temps : plus d'une décennie est prévue en l'espèce. En France, le *Plan France Très Haut Débit*, qui est intervenu rapidement après le début des premiers investissements privés, a pourtant permis de lancer la couverture de territoires ruraux, non rentables pour les opérateurs privés, très tôt par rapport à d'autres pays européens.

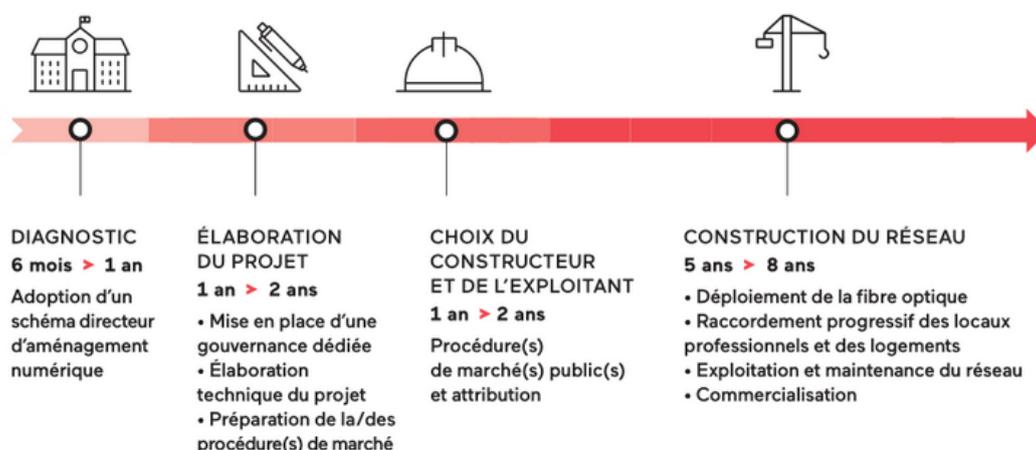
À la fin du deuxième trimestre 2020, soit dix ans après le début des déploiements, 52 % des locaux en France sont couverts par des réseaux FttH. Ces chiffres cachent une réalité non homogène sur l'ensemble du territoire : 82 % des locaux couverts en zone très dense, 66 % des locaux en zone moins dense d'initiative privée, et 25 % des locaux en zone moins dense d'initiative publique<sup>82</sup>.

Comme le montre la figure 9, les déploiements publics sont plus complexes (adoption d'un schéma directeur, processus de mise en concurrence, etc.) que les déploiements privés, ce qui explique la moindre couverture à ce stade dans les zones publiques.

---

<sup>82</sup> Observatoire haut et très haut débit : abonnements et déploiements, T2 2020, Arcep.

**Figure 9 – Chronologie du déploiement des réseaux d’initiative publique**



Source : Agence du numérique

Le déploiement des réseaux d'accès mobiles, bien que plus rapide, ne se fait pas non plus en un jour. En France, les deux premières bandes de fréquences spécifiquement affectées à la 4G (la bande 2,6 GHz et la bande 800 MHz) ont été attribuées aux opérateurs entre fin 2011 et début 2012. Fin 2015, l'opérateur mobile ayant le réseau 4G le plus étendu couvrait les trois quarts de la population. En 2018, la majorité des opérateurs couvrait 99 % de la population en 4G.

Le mur d'investissement auquel les opérateurs sont confrontés est d'autant plus élevé que le renouvellement des réseaux d'accès fixes et mobiles se fait de manière simultanée. Au cours des cinq dernières années, ce sont ainsi un peu plus de 43 milliards d'euros qui ont été investis par les opérateurs télécoms français principalement dans leurs réseaux FttH et 4G (Tableau 12).

**Tableau 12 – Investissement hors achats de fréquences mobiles des opérateurs de télécommunications en France (en milliards d'euros)**

	2014	2015	2016	2017	2018
Réseaux fixes	4,7	5,5	6,2	6,6	7,0
Réseaux mobiles	2,4	2,3	2,7	3,0	2,8
Total	7,1	7,8	8,9	9,6	9,8

Source : Fédération française des Télécoms, d'après données Arcep

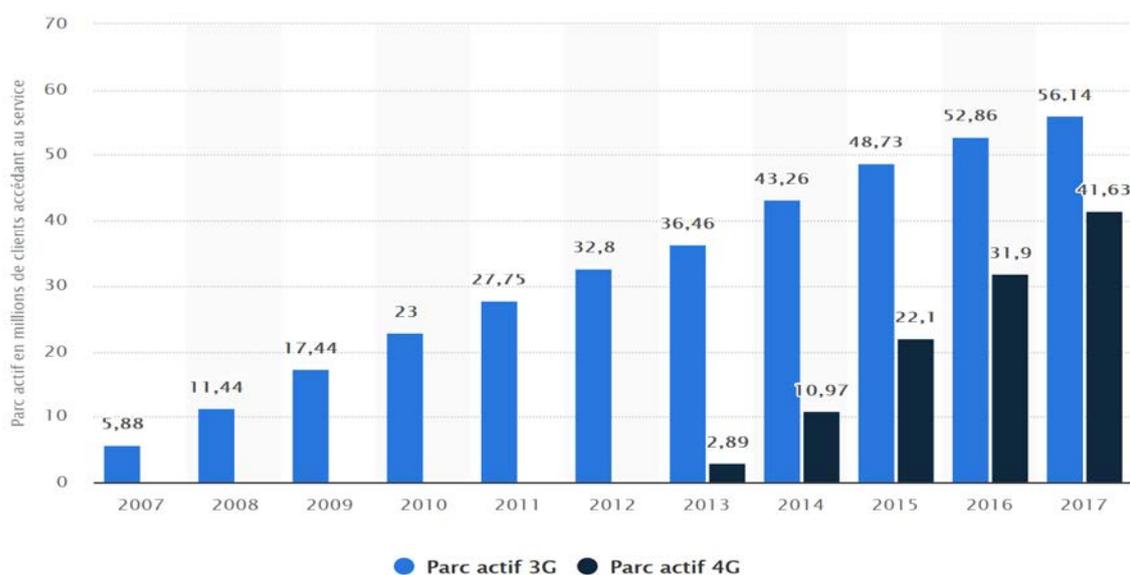
### 1.5.2. Seconde limite : l'existence en parallèle de plusieurs générations de réseaux d'accès

Aux contraintes financières et opérationnelles du déploiement s'ajoute le temps nécessaire à la migration des usagers vers les nouveaux réseaux. Pendant ces périodes de transition, plusieurs générations de réseaux sont utilisées en même temps, ce qui limite les gains énergétiques rendus possibles par les nouvelles technologies.

Pour les réseaux fixes, cette superposition des réseaux d'accès existe actuellement en France du fait de la transition en cours du cuivre vers la fibre. En France, au total, sur 16,7 millions de locaux éligibles à la fibre au troisième trimestre 2019, on dénombrait seulement 6,3 millions d'abonnés. Cette existence simultanée devrait cependant être limitée dans le temps par les opérateurs afin d'optimiser leurs coûts de fonctionnement : coûts énergétiques, mais également coût de l'emplacement des équipements dans les NRA et NRO, etc.

De la même manière, un facteur majeur de l'inefficacité énergétique des réseaux d'accès mobile tient à la superposition des différentes générations de technologies mobiles. Ce problème est plus structurel que dans le fixe : en effet, chaque génération de réseau mobile est venue répondre à un besoin différent. Les technologies 2G, 3G et 4G cohabitent toujours car sont actuellement toujours complémentaires.

**Graphique 28 – Parc actif 3G et 4G en France de 2007 à 2017  
(en millions de clients accédant au service)**



Source : Statista, 2019

On constate ainsi que, parallèlement à la hausse des utilisateurs de 4G, le parc actif 3G continue de croître et reste en 2017 supérieur à celui de la 4G (Graphique 28).

L'effet de cette superposition est simple : la consommation des réseaux mobiles s'en trouve multipliée, puisque celle-ci est intrinsèquement liée à la consommation des stations de base existantes.

La suppression progressive des technologies anciennes se heurte cependant à d'évidentes limites, à commencer par le parc de téléphones portables non compatible avec la 4G. La bascule d'un client vers la 4G étant conditionnée au renouvellement de son équipement terminal.

Un autre problème se situe du côté des équipements utilisant spécifiquement ces réseaux « obsolètes », comme pour les connexions machine à machine notamment (ancêtre de l'IoT).

Round Solutions souligne<sup>83</sup> que, pendant des années, la majorité de ce qui allait devenir l'IoT mondial a utilisé des réseaux d'accès 2G permettant l'échange de petits paquets de données entre machines à bas prix. Or, cette technologie est en passe d'être définitivement abandonnée.

Tant pour le fixe que pour le mobile, les freins résiduels à la fermeture de certaines technologies anciennes (cuivre, 2G, 3G) devraient être analysés par l'Arcep afin de les lever, et la fermeture encadrée pour limiter l'empreinte énergétique des réseaux télécoms.

## 1.6. Les effets rebonds liés au développement des usages

Comme expliqué *supra*, la consommation énergétique unitaire des nouvelles technologies numériques est inférieure à celle de leurs aînées. Cependant, le risque d'effets rebonds est grand, et d'ores et déjà constaté. Le fait est que la réduction de l'empreinte énergétique unitaire théorique des nouvelles générations de réseaux télécoms concorde avec l'augmentation des débits proposés par ces réseaux, laquelle induit une croissance du trafic internet.

### 1.6.1. L'explosion du trafic, principal effet rebond de l'augmentation des débits

Comme susmentionné, le très haut débit progresse en France et en Europe, comme dans le reste du monde<sup>84</sup>.

**Tableau 13 – Débit moyen des accès fixes à haut et très haut débit par régions du monde en Mbit/s (projections à partir de 2018)**

	2017	2018	2019	2020	2021	2022	Taux de croissance annuel moyen 2017-2022
Global	39,0	45,9	52,9	60,4	67,9	75,4	14 %
Asie Pacifique	46,2	62,8	79,4	87,5	92,7	98,8	16 %
Amérique latine	11,7	15,7	19,7	22,0	25,0	28,1	19 %
Amérique du Nord	43,2	56,6	70,1	79,6	87,9	94,2	17 %
Europe de l'Ouest	37,9	45,6	53,2	60,8	68,4	76,0	15 %
Europe centrale et de l'Est	32,8	35,0	37,2	40,8	43,7	46,7	7 %
Moyen Orient et Afrique	7,8	9,7	11,7	15,7	17,6	20,2	21 %

Source : Cisco VNI, 2018

<sup>83</sup> « What the Global 2G Shutdown Means for IOT/M2M Companies around the World », 1<sup>er</sup> août 2017.

<sup>84</sup> Il n'existe pas de définition unique du très haut débit. La France, alignée sur les canons européens, considère qu'un accès à internet est qualifié de haut débit entre 2 Mbit/s et 30 Mbit/s de débit descendant ; au-delà, on parle de très haut débit.

Selon Cisco<sup>85</sup>, la vitesse mondiale moyenne du débit internet fixe devrait être multipliée par deux entre 2017 et 2022, de 39 Mbit/s à 75,4 Mbit/s, conséquence de la progression des technologies permettant d'accéder au très haut débit (Tableau 13).

**Tableau 14 – Débit moyen des connexions mobiles par régions du monde en Mbits/sec (projections à partir de 2018)**

	2017	2018	2019	2020	2021	2022	Taux de croissance annuel moyen 2017-2022
Global	8,7	13,2	17,7	21,0	24,8	28,5	27 %
Europe de l'Ouest	16,0	23,6	31,2	37,2	43,8	50,5	26 %
Europe centrale et de l'Est	10,1	12,9	15,7	19,5	22,8	26,2	21 %
Moyen Orient et Afrique	4,4	6,9	9,4	11,2	13,2	15,3	28 %
Amérique du Nord	16,3	21,6	27,0	31,9	36,9	42,0	21 %
Asie Pacifique	10,6	14,3	18,0	21,7	25,3	28,8	22 %
Amérique Latine	4,9	8,0	11,2	13,0	15,3	17,7	30 %

Source : Cisco VNI, 2018

Ce qui est vrai pour les réseaux fixes l'est aussi pour les réseaux mobiles dont les débits moyens au niveau mondial devraient progresser de 8,7 à 28,5 Mbit/s entre 2017 et 2022 (Tableau 14). Cette augmentation des débits moyens dans le monde est liée à la progression de la 4G, qui offre un débit réel oscillant entre 10 et 80 Mbit/s.

**Or, la disponibilité de réseaux fixes et mobiles à haut et très haut débit s'accompagne quasi automatiquement d'une hausse du trafic internet par utilisateur.**

Quel que soit le réseau, le lien causal entre hausse du débit proposé et hausse du trafic internet est logique : plus le débit disponible sur les réseaux augmente, plus l'utilisation de services et applications mobilisant une grande bande passante est fluide et donc pratiquée. Les usages s'adaptent aux débits disponibles. Parmi ces services particulièrement gourmands en bande passante dont l'utilisation est en train de se généraliser grâce aux débits disponibles, la vidéo occupe une place prépondérante. Comme mentionné dans le chapitre 1, la part de la vidéo dans le trafic internet est en train d'exploser et représente déjà 75 % du trafic total en 2017.

Or cette croissance du trafic est susceptible d'annuler, en tout ou partie, le gain énergétique induit par les nouvelles technologies.

<sup>85</sup> Cisco Visual Networking Index: forecast and trends, 2017-2022.

Dans les réseaux fixes, la consommation des CPE et des équipements de la boucle locale est indifférente au trafic. Cependant, l'augmentation drastique du trafic est susceptible d'inverser la hiérarchie actuelle de consommation énergétique des segments de réseaux<sup>86</sup> : les CPE et les réseaux d'accès seront vraisemblablement dépassés à terme par les cœurs de réseau dont la consommation énergétique dépend du trafic. Comme susmentionné, cette thèse d'un transfert de l'impact énergétique de la hausse du trafic vers le segment amont des cœurs de réseaux est cependant nuancée par des travaux qui tablent sur une amélioration continue de l'intensité énergétique des cœurs de réseaux. La question reste donc ouverte : l'amélioration de l'intensité énergétique n'étant pas incompatible avec une hausse drastique de la consommation énergétique des cœurs de réseau, si le trafic explose réellement.

Concernant les réseaux mobiles, la consommation énergétique des équipements 4G est fortement dépendante du trafic. L'explosion du trafic mobile entraîne donc une croissance de la consommation énergétique des réseaux 4G.

À ce titre, il convient de mentionner que les choix commerciaux des opérateurs ne sont pas étrangers à la hausse du trafic internet mobile. En effet, pour rester compétitifs, les fournisseurs de services mobiles ne cessent de repousser les plafonds mensuels d'utilisation des données, certaines offres excédant aujourd'hui 50 Go par mois. Cisco constate une rupture avec la tendance générale d'une offre en paliers, pour monnayer l'octroi de données supplémentaires et contenir la consommation des gros utilisateurs.

### 1.6.2. Limiter les effets de la densification des réseaux mobiles

Pour répondre à la demande croissante des utilisateurs en données, les opérateurs doivent augmenter la capacité des réseaux mobiles en multipliant le nombre de bandes de fréquences activées sur un site donné, ainsi qu'en augmentant le nombre de sites mobiles pour couvrir une zone donnée. Ces deux actions ont pour effet, d'une part, une augmentation de la consommation par site mobile, d'autre part, une augmentation globale de la consommation énergétique du réseau.

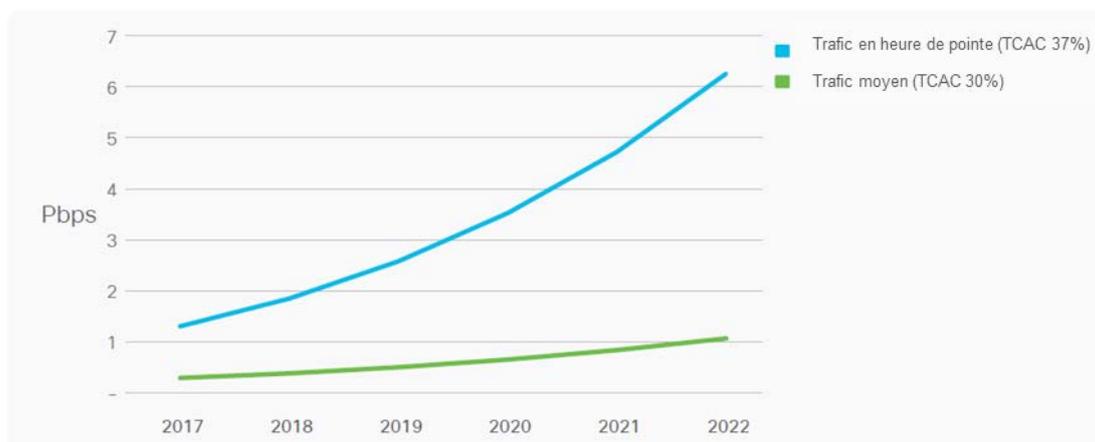
Ce qui était d'ores et déjà vrai pour la 4G le sera encore plus pour la 5G. Pour Huawei, la densification de nombre de bandes de fréquences activées par site mobile, nécessaire à la fourniture des services attendus de la 5G, explique l'augmentation attendue de la consommation des réseaux 5G. Huawei indique ainsi que : « *L'activation de plusieurs bandes sur un site sera la configuration typique de l'ère 5G. La proportion de sites avec plus de cinq bandes passera de 3 % en 2016 à 45 % en 2023. Par conséquent, la consommation énergétique maximale d'un site sera supérieure à 10 kW, et dans un site mobilisant plus de 10 bandes, la puissance de consommation dépassera 20 kW* »<sup>87</sup>.

---

<sup>86</sup> Coroama V. C. *et al.* (2014), « The Energy Intensity of the Internet : Home and access Networks ».

<sup>87</sup> En anglais dans le document: « *Multiple bands in one site will be the typical configuration in the 5G era. The proportion of sites with more than five bands will increase from 3% in 2016 to 45% in 2023. As a result, the maximum power consumption of a site will be higher than 10 kW, in a site where there is more than 10 bands, the power consumption will exceed 20 kW* ».

**Graphique 29 – Comparaison de l'évolution du trafic internet moyen et en heure de pointe (en péta bits par seconde)**



Source : Cisco VNI, 2018

Qui plus est, si le trafic internet moyen semble avoir une croissance stable, on ne peut pas en dire autant du trafic « à l'heure de pointe », définie par Cisco comme l'heure avec l'afflux le plus massif de données par jour (Graphique 29).

La croissance extrêmement rapide du trafic « à l'heure de pointe », tant dans les réseaux fixes, que mobiles, repose essentiellement sur l'essor de la vidéo, qui, à la différence d'autres utilisations d'internet, est principalement consommée à des heures précises de la journée. Les grands rendez-vous comme les live vidéo notamment créent des pics de consommation (rencontres sportives, etc.), de même que les appels vidéo (type Skype) ou encore les vidéos générant une atmosphère propice à la détente après le travail. Comme expliqué dans le chapitre 1, ces vidéos tendent en outre de plus en plus vers la très haute définition, ce qui implique un trafic et une consommation énergétique croissante.

Ce qui est problématique, comme l'explique Janine Morley, c'est que les réseaux télécoms sont conçus pour satisfaire les pics de trafic et non un trafic moyen<sup>88</sup>. La densification des réseaux mobiles et la croissance énergétique qu'elle entraîne ne sont donc utiles que pendant quelques heures par jour.

Pour réduire la consommation énergétique des réseaux mobiles, des axes de travail existent : c'est notamment le cas des partages de réseaux entre opérateurs et de la mise en veille des équipements en dehors des pics de trafic.

Bien que mentionné par le BEREC<sup>89</sup> (Body of European Regulators for Electronic Communications) comme un levier de réduction de la consommation énergétique, le potentiel réel du partage de réseaux ne semble, à ce jour, pas étayé. Il conviendrait donc que l'Arcep et le BEREC instruisent le potentiel réel de réduction de la consommation énergétique du partage de réseaux mobiles en distinguant les différentes solutions de partage de réseaux existantes.

<sup>88</sup> Morley J., Widdicks K. et Hazas M. (2018), « Digitalisation, energy and data demand: The impact of Internet traffic on overall and peak electricity consumption ».

<sup>89</sup> BEREC (2019), [Common Position on Mobile Infrastructure Sharing](#).

Des solutions de mise en veille des stations de base mobiles sont par ailleurs proposées par les équipementiers pour minimiser l’empreinte énergétique de ces réseaux. Comme l’expliquent Rémi Bonnefoi *et al.*, deux types de veilles sont possibles :

« Ces veilles peuvent se faire pendant de longues durées lorsqu’il n’y a pas d’utilisateurs dans la cellule. Une seconde solution consiste à mettre en veille dynamiquement la station de base pendant des temps très courts (de l’ordre de la milliseconde) »<sup>90</sup>.

Ces modes de veille sont contrôlés par des algorithmes qui décident en temps réel des antennes qui doivent être « allumées » pour s’ajuster à la demande en trafic.

Lors de son intervention à France Stratégie, Azeddine Gati a indiqué qu’Orange a lancé un chantier ayant pour objectif d’atteindre une consommation de « zéro watt pour zéro trafic ».

Il conviendrait de développer la connaissance du niveau de déploiement de ces solutions de mise en veille en France et en Europe, ainsi que des gains attendus, pour accompagner les opérateurs dans leur chantier d’optimisation de la consommation des réseaux mobiles. Cette étude pourrait être réalisée conjointement par l’Arcep et le BEREC.

## 1.7. Conclusion

En conclusion, si le progrès technologique est réel sur le segment des réseaux télécoms, il ne constitue pas un moyen suffisant pour diminuer effectivement l’empreinte énergétique des télécoms. En effet, l’augmentation des débits disponibles, qui reste actuellement le principal objectif du progrès technologique, provoque par effet rebond une explosion du trafic Internet, qui fait ré-augmenter la consommation.

Cela ne signifie pas pour autant que les travaux d’optimisation de l’efficacité énergétique doivent être abandonnés. En effet, sans eux la consommation énergétique des réseaux exploserait.

Comme l’explique l’AIE, « la consommation directe d’énergie à long terme continuera à être un combat entre la demande croissante de données et l’amélioration de l’efficacité énergétique »<sup>91</sup>.

Pour cette raison, il conviendrait que la France veille à former ses ingénieurs télécom aux techniques du « green for IT ». Dans son intervention, Azeddine Gati alertait ainsi les pouvoirs publics sur le retard de la France dans ce domaine et recommandait de stimuler la formation initiale dans les universités et les écoles d’ingénieurs, ainsi que la formation continue.

---

<sup>90</sup> Bonnefoi R., Moy C. et Palicot, J. (2017), « Mises en veille dynamiques pour minimiser la consommation d’énergie d’une station de base », Colloque GRETSI, Juan-Les-Pins, septembre.

<sup>91</sup> AIE (2017), « Direct energy use over the long run will continue to be a battle between data demand growth versus the continuation of efficiency improvements », *Digitalization & Energy*, novembre, p. 18.

## 2. Comprendre l'impact du progrès technologique dans la consommation des data centers

### 2.1. L'empreinte des data centers en quelques chiffres

En 2012, le nombre total de data centers dans le monde était selon Emerson Network Power de l'ordre de 510 000. Ils occupaient une surface de 26,55 km<sup>2</sup> et consommaient de l'ordre de 30 GW, soit l'équivalent de 20 à 30 réacteurs nucléaires.

Dans une étude de 2014, IDC prévoit pour sa part que le nombre total de data centers devait atteindre un maximum de 8,6 millions en 2017 pour ensuite décliner lentement. En 2017, ces data centers devaient représenter une puissance appelée totale de l'ordre de 50 GW. La surface occupée au sol estimée à 146,79 km<sup>2</sup> en 2013 devait, selon leurs estimations, atteindre 180,23 km<sup>2</sup> en 2018.

Il convient tout d'abord de noter que les écarts majeurs entre ces deux études s'expliquent certes par une croissance réelle du nombre de data centers en activité, mais aussi en partie par la difficulté à connaître le nombre total de data centers dans le monde et tout particulièrement le nombre de data centers internes des entreprises. Il existe en effet quatre catégories différentes :

- les data centers internes d'entreprises ;
- les data centers d'hébergement en colocation ;
- les data centers d'hébergement de services de cloud computing ;
- les data centers de calcul intensif (ou hyper scale data centers).

La consommation totale des data centers masque en réalité des situations très hétérogènes, un seul data center, parmi les plus puissants, pouvant atteindre des puissances consommées supérieures à 100 MW.

À titre d'illustration, la consommation totale des data centers de Google – parmi les plus gros dans le monde – était estimée en 2011 à 2 TWh/an, pour une puissance installée de 260 MW<sup>92,93</sup>, qui correspondait approximativement à 1,3 million de serveurs (200 W par serveur).

Mais globalement les petits et moyens data centers représentent la moitié de la consommation mondiale et les très gros data centers ne représentent que 4 % de cette consommation<sup>94</sup>. Cette répartition est amenée à évoluer. En effet, on constate une tendance forte de migration des usages des petits data centers internes vers de très gros data centers opérant pour différents clients en mutualisant les infrastructures. Nous verrons que cette tendance n'est pas sans effet sur l'évolution de la consommation énergétique globale des data centers.

---

<sup>92</sup> « Growth in Data Center Electricity Use 2005 to 2010 », Jonathan Koomey, Analytics Press, août 2011.

<sup>93</sup> « Google details, and defends, its use of electricity », James Glanz, *The New York Times*, septembre 2011.

<sup>94</sup> « Data Center Efficiency Assessment », *NRDC White paper*, 2014.

## 2.2. Le progrès technologique au service de l'optimisation énergétique des data centers

Comme le souligne le Syntec Numérique, « l'énergie [représente] la principale charge en phase d'exploitation d'un data center et peut représenter jusqu'à 75 % des coûts d'exploitation »<sup>95</sup>.

On comprend dès lors que, à l'image de la tendance constatée dans le secteur des télécoms, les entreprises gestionnaires de data centers ont une réelle incitation économique à optimiser la consommation énergétique de leurs infrastructures. La consommation énergétique d'un data center se répartit entre ses différents composants, à savoir :

- les infrastructures techniques supports et tout particulièrement les systèmes de refroidissement ;
- les équipements informatiques, dont les serveurs assurant le traitement des données et les systèmes de stockage.

Pour maximiser les gains énergétiques, les efforts d'optimisation de l'efficacité énergétique des data centers portent sur l'ensemble de ces postes.

### 2.2.1. Réduction considérable de la consommation liée aux systèmes de refroidissement et de climatisation

Les systèmes de refroidissement et de climatisation sont indispensables au bon fonctionnement des équipements informatiques hébergés dans les data centers. En effet, comme l'explique le Syntec Numérique dans son livre vert sur les data centers<sup>96</sup> : « l'énergie électrique consommée par les équipements informatiques est quasi intégralement convertie en chaleur. À l'échelle d'une salle, la puissance dissipée est colossale. Sans système de conditionnement d'air, la température atteindrait en quelques minutes un seuil au-delà duquel les équipements cesseraient de fonctionner ».

L'industrie des data centers a défini une norme<sup>97</sup> pour mesurer l'efficacité énergétique de ceux-ci. Elle repose sur l'Indicateur d'efficacité énergétique ou PUE pour *Power usage effectiveness*. Le PUE permet de comparer la consommation électrique des équipements informatiques avec la consommation électrique totale du data center. En pratique, un PUE de 2,0 signifie que pour chaque watt d'alimentation du système informatique, un watt supplémentaire est consommé pour refroidir et distribuer l'électricité aux équipements informatiques, le watt restant étant consommé par lesdits équipements. Un PUE proche de 1,0 signifie que la quasi-totalité de l'énergie est utilisée pour l'informatique.

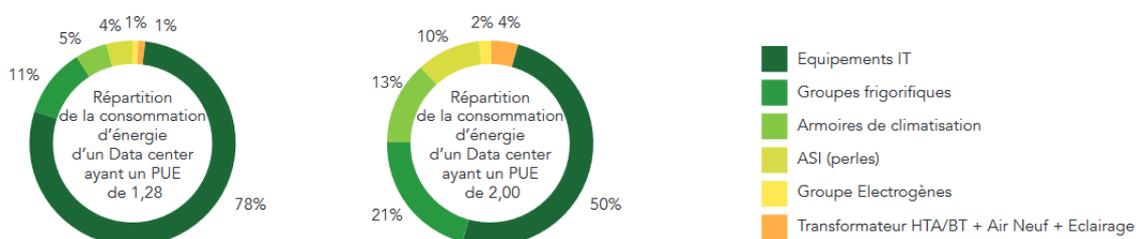
---

<sup>95</sup> Livre blanc : les indicateurs de performance énergétique et environnementale des data centers, 2017, Alliance Green IT, France Data Center et Gimélec.

<sup>96</sup> Livre vert : Data centers et développement durable, État de l'art et perspectives, juin 2011, Syntec Numérique.

<sup>97</sup> Harmonizing Global Metrics for Data Center Energy Efficiency: ICT Code of Conduct, Institute for Energy and Transport, Joint Research Centre, European Commission, October 2012, [http://iet.jrc.ec.europa.eu/energyefficiency/sites/energyefficiency/files/documents/ICT\\_CoC/harmonizing\\_global\\_metrics\\_for\\_data\\_center\\_energy\\_efficiency\\_2012-10-02.pdf](http://iet.jrc.ec.europa.eu/energyefficiency/sites/energyefficiency/files/documents/ICT_CoC/harmonizing_global_metrics_for_data_center_energy_efficiency_2012-10-02.pdf).

**Figure 10 – Répartition de la consommation énergétique en fonction du niveau de l'efficacité énergétique des systèmes de refroidissement (indicateur PUE)**



Source : Livre blanc, les indicateurs de performance énergétique et environnementale des data centers, 2017

Le PUE est le principal indicateur utilisé par l'industrie pour mesurer l'efficacité énergétique des data centers. Cependant, cette métrique ne considère pas l'efficacité énergétique des serveurs eux-mêmes, mais celle des systèmes support de refroidissement.

Il est à noter que la part de l'énergie consommée par les data centers pour leur refroidissement, qui était de l'ordre de 50 %, il y a quelques années (PUE de 2,0), tend désormais, pour les nouvelles générations de data centers, à se réduire à 20 %, voire 10 %. Au premier trimestre 2017, pour ce qui est des *data centers* de Google<sup>98</sup>, l'objectif de 1 était presque atteint. Google en a fait un objet de communication marquant sa volonté de réduction de sa consommation d'énergie. Pour obtenir ces résultats, l'industrie utilise un ensemble de solutions complémentaires :

- déploiement de nouveaux équipements informatiques dont les composants supportent des températures de fonctionnement plus élevées ;
- optimisation de l'urbanisation des salles informatiques permettant d'améliorer la gestion de la circulation de l'air, par exemple en confinant les allées chaudes et froides ;
- mise en place de nouvelles techniques de refroidissement moins consommatrices, telles que celles de Free Cooling, qui permettent de tirer parti de la température extérieure pour refroidir naturellement les équipements. Le choix de la localisation des data centers n'est donc pas sans incidence sur leurs gains énergétiques. Cela explique pourquoi de nombreux data centers d'hébergement de services de cloud computing sont installés dans des zones bénéficiant d'un climat frais, voire dans des régions proches de l'arctique.

De nouvelles techniques visent également à récupérer et valoriser la chaleur produite par les équipements informatiques (chaleur fatale) pour alimenter des systèmes de chauffage urbain. C'est le cas, par exemple, de la start-up française Stimergy qui a développé et commercialise une solution de « chaudière numérique » pour chauffer de l'eau. Invité par France Stratégie, Christophe Perron, président de Stimergy, a présenté sa solution consistant à installer des mini data centers dans la chaufferie d'immeubles collectifs ou de piscines : grâce à un système de refroidissement liquide, Stimergy capte la chaleur émise par les équipements informatiques et la transfère au système de production d'eau chaude sanitaire, permettant ainsi de diviser par plus de deux l'énergie nécessaire à la production d'eau chaude sur l'année<sup>99</sup>. En 2017,

<sup>98</sup> Google Data Centers, Efficiency: How we do it, 2016/03,

[www.google.co.uk/about/datacenters/efficiency/internal/#measuring-efficiency](http://www.google.co.uk/about/datacenters/efficiency/internal/#measuring-efficiency).

<sup>99</sup> Voir la présentation de Stimergy lors du séminaire de France Stratégie du 13 mars 2018.

l'ADEME évaluait à 3,6 TWh le gisement à récupérer auprès du parc de data centers national (177 data centers hébergeurs répertoriés en 2015)<sup>100</sup>.

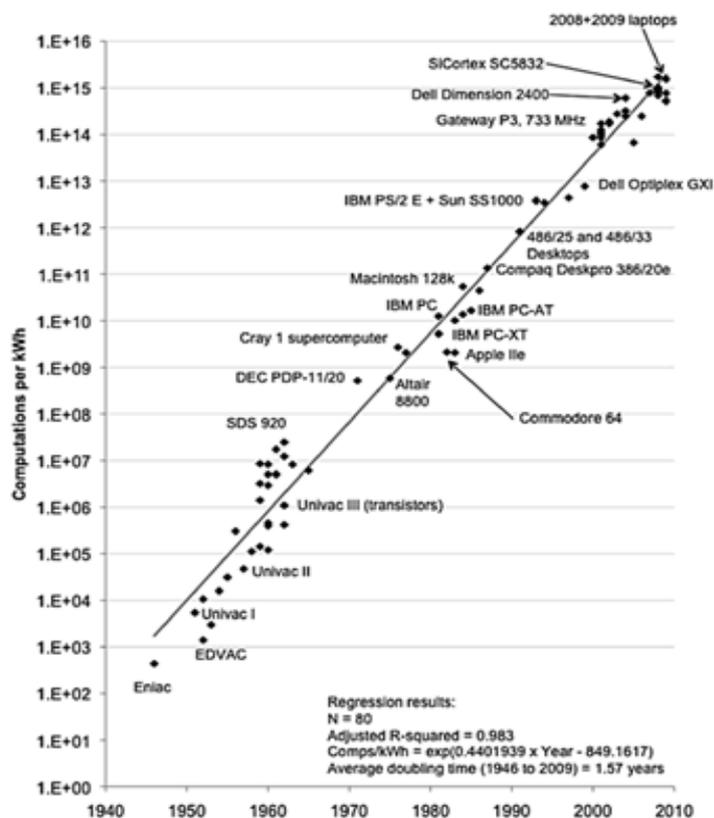
## 2.2.2. Le progrès technique au service de la réduction de la consommation des équipements IT

Si les systèmes de climatisation ont été fortement optimisés ces dernières années, les composants informatiques des data centers ne sont pas en reste. On constate en effet de réels progrès dans l'efficacité énergétique tant des serveurs que des systèmes de stockage.

### Réduction de la puissance nécessaire au traitement des données

La performance des supercalculateurs s'évalue usuellement en opérations en virgule flottante par seconde ou Flops (*Floating point Operations Per Second*). Ainsi, celle atteinte par les supercalculateurs actuels est de l'ordre de plusieurs dizaines, voire la centaine pour les plus performants<sup>101</sup>, de Peta Flops (un Peta Flop =  $10^{15}$  Flops). À titre de comparaison, la performance d'un ordinateur de bureau actuel est d'un Giga Flop ( $10^9$  Flops).

**Graphique 30 – Performances des calculateurs de 1940 à 2010**  
(nombre d'opérations réalisées par kWh, échelle logarithmique)



Source : « Implications of historical trends in the electrical efficiency of computing », Koomey J.G., Berard S., Sanchez M., Wong H., *IEEE Annals of the History of Computing*, Vol. 33, No 3, July-September 2011, p. 46-54.

<sup>100</sup> ADEME (2017), *La chaleur fatale, Faits et chiffres*.

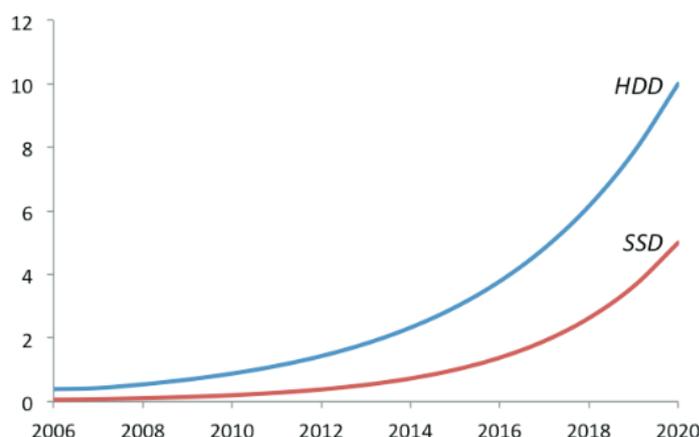
<sup>101</sup> TOP500 / Green500 Lists, [www.top500.org](http://www.top500.org).

Loin de ces machines exceptionnelles, le graphique 30 retrace l'évolution du nombre d'opérations réalisées par kWh des premiers calculateurs à ceux disponibles en 2010. Ce nombre d'opérations par kWh a été multiplié par 2 tous les moins de 2 ans (1,57) entre 1946 et 2010<sup>102</sup>.

### Progrès technique dans les équipements de stockage

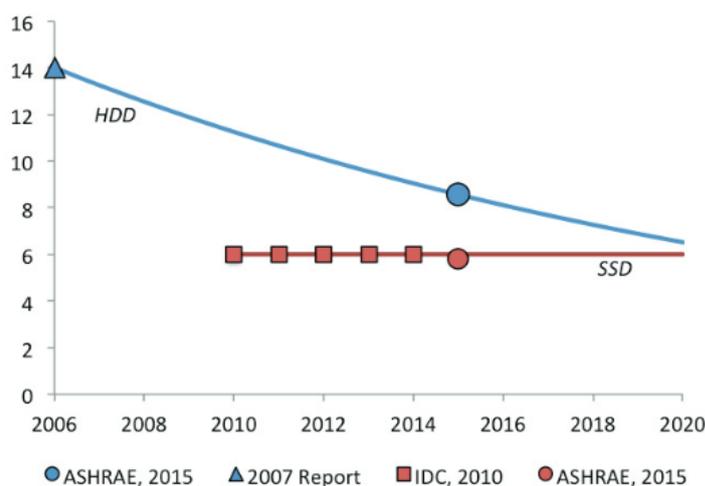
Les gains proviennent également du progrès technologique dans les solutions de stockage des données. Dans leur rapport de 2016<sup>103</sup>, Shehabi *et al.* indiquent que les équipements de stockage (disques HDD et SSD<sup>104</sup>) sont de plus en plus efficaces.

**Graphique 31 – Évolution de la capacité moyenne des disques de stockage des data centers américains (en téraoctets par disque)**



Source : United States data center energy usage report, 2016

**Graphique 32 – Évolution de la puissance moyenne par disque de stockage dans les data centers américains (en W)**



Source : United States data center energy usage report, 2016

<sup>102</sup> Ce que le graphique n'indique pas, c'est que la taille de la représentation des nombres flottants est passée de 32 bits dans les années 1980 à 64 bits dans les années 2000.

<sup>103</sup> United States data center energy usage report, 2016.

<sup>104</sup> De l'anglais « hard disk drive » et « solid-state drive ».

Cette amélioration de l'efficacité des équipements de stockage est double : on constate, d'une part, une croissance de la capacité de stockage par disque, avec un taux de croissance annuel de 27 %, résultant en 2020 en une capacité moyenne de 10 To/disque HDD et de 5 To/disque SSD (Graphique 31), d'autre part, une diminution de 5 % par an de la consommation énergétique unitaire moyenne des disques HDD sur la période 2006-2015 (de 14 W/disque à 8,6 W/disque), qui devrait se poursuivre jusqu'en 2020 (pour atteindre 6,5 W/disque) et une consommation unitaire moyenne constante mais inférieure (6 W/disque) des disque SSD (Graphique 32).

Concernant les disques SSD, les estimations de Shehabi *et al.*, qui tablent sur un maintien de la consommation unitaire par disque accompagné d'une croissance forte de la capacité de stockage par disque, confortent les attentes de l'industrie selon lesquelles la capacité SSD par watt sera multipliée par trois ou quatre d'ici 2020.

### **Gain en efficacité des technologies numériques et tendances**

Le gain en efficacité énergétique des systèmes de traitement et de stockage des données numériques est dû à l'augmentation exponentielle des performances des composants électroniques intégrés depuis une trentaine d'années. Quantitativement cela s'est traduit par un doublement de la densité d'intégration tous les 18 à 24 mois.

La question est de savoir si cette tendance va se poursuivre, à quel rythme, pendant combien de temps et quelles seront les incidences énergétiques.

Une des meilleures sources sur l'évolution de l'industrie du composant électronique est constituée des rapports ITRS (*International Technology Roadmap for Semiconductors*)<sup>105</sup> devenus IRDS (*International Roadmap for Devices and Systems*) en 2016 produit tous les deux ans depuis 1992. Leur édition (2015) donne une projection à quinze ans de l'évolution technologique du domaine.

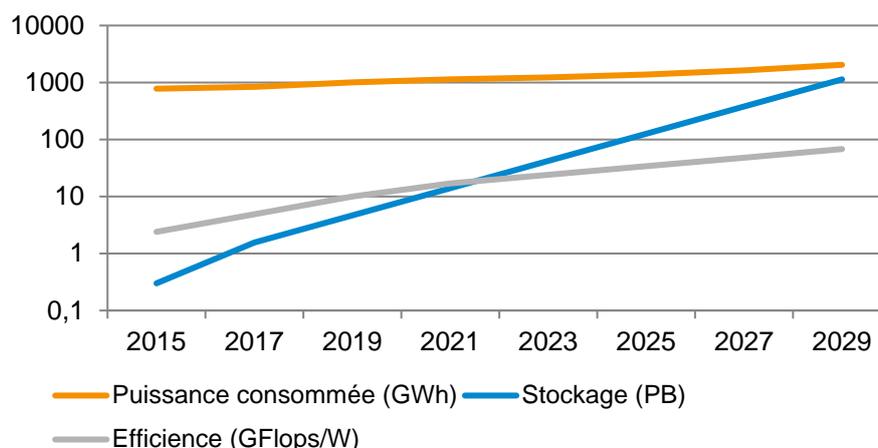
**Tableau 15 – Projection à quinze ans de la capacité de stockage, de la puissance consommée et de l'efficacité énergétique des data centers**

	2015	2017	2019	2021	2023	2025	2027	2029
Stockage (PB)	0,3	1,56	4,68	14	42	126	380	1 136
Puissance consommée (GWh)	780	839	1 005	11 37	1 226	1 381	1 636	2 044
Efficacité (GFlops/W)	2,4	4,9	10	17	24	34	48	68

Source : *International Technology Roadmap for Semiconductors 2.0, 2015 Edition*

<sup>105</sup> Voir [www.itrs2.net](http://www.itrs2.net).

**Graphique 33 – Évolution à quinze ans de la capacité de stockage, de la puissance consommée et de l'efficacité énergétique des data centers**



Source : *International Technology Roadmap for Semiconductors 2.0 2015 Edition*

Concernant les data centers, les projections de l'*executive report* de 2015, présentées dans le tableau 15 et le graphique 33, s'appuient sur l'évolution des composants et de leur intégration en tenant compte du franchissement de seuils technologiques (taille de gravure, fabrication des composants, etc.). Les séries de chiffres du tableau ci-dessus montrent toutes des progressions géométriques jusqu'en 2029. La pérennité de telles progressions sur le long terme demeure cependant incertaine : en cause, les limites physiques à la miniaturisation et les contraintes liées à la dissipation de la chaleur.

### 2.2.3. L'optimisation de l'utilisation des équipements IT, un large chantier à adresser dans l'avenir

Au-delà des gains attendus du progrès technique dans les systèmes de refroidissement et les équipements informatiques, la diffusion de bonnes pratiques d'optimisation de l'utilisation des équipements informatiques permet également d'améliorer l'efficacité énergétique globale des data centers. En effet, une large part de la consommation énergétique des data centers peut être évitée en améliorant la gestion des infrastructures IT. À ce titre, il convient de noter que l'optimisation du taux d'utilisation des équipements IT permet évidemment de réduire la consommation des équipements informatiques, mais aussi, par ricochet, celle des systèmes de refroidissement<sup>106</sup>.

Le premier levier d'optimisation consiste à identifier et réaffecter, débrancher ou tout simplement supprimer les serveurs physiques qui ne sont plus du tout utilisés : ces serveurs sont couramment appelés serveurs « zombies » ou « comateux ». Un serveur est considéré comme « zombie » ou « comateux » après six mois d'inactivité<sup>107</sup>.

<sup>106</sup> Ceci car moins d'équipements informatiques actifs créent moins de chaleur, ce qui implique moins de besoins en refroidissement.

<sup>107</sup> Définition du serveur zombie/comateux retenue par Kommey et Taylor : « *Showed no signs of network, user, connection, memory or CPU activity in six months or more* ».

Le cœur du problème, comme le remarquent Jonathan Koomey et Jon Taylor qui ont réalisé deux études successives sur ces serveurs zombies, est que « *peu d'entreprises peuvent identifier ces serveurs orphelins, et beaucoup d'entreprises ne savent même pas combien de serveurs elles possèdent* ».

Dans leur première étude de 2015, Koomey et Taylor aboutissent à la conclusion que 30 % des serveurs d'un échantillon de 4 000 serveurs physiques répartis sur cinq data centers relèvent de cette qualification de serveurs zombies<sup>108</sup>. En se fondant sur ces premiers résultats et en élargissant leurs conclusions, les auteurs estiment qu'il devrait y avoir 3,6 millions de serveurs zombies aux États-Unis et 10 millions dans le monde entier<sup>109</sup>.

Dans leur étude de 2017<sup>110</sup>, qui porte désormais sur quatre fois plus de serveurs et deux fois plus de data centers, les auteurs obtiennent des résultats plus précis :

- 25 % des serveurs physiques (serveurs dédiés et serveurs virtualisés confondus) des entreprises n'ayant pas lancé de chantier dédié à cette problématique<sup>111</sup> sont comateux ;
- plus inquiétant, 30 % des « machines virtuelles » tournant sur des serveurs virtualisés et 10 % des serveurs virtualisés eux-mêmes sont comateux. On voit donc que l'inefficacité dans la gestion des ressources informatiques touche de la même manière les serveurs physiques et les serveurs virtualisés.

Pour Koomey et Taylor, ce dernier apport est essentiel dans la mesure où « *de nombreux experts du secteur considèrent que la virtualisation est une solution miracle pour atteindre un taux d'utilisation élevée des serveurs* »<sup>112</sup>. Pour eux, « *la virtualisation sans technologie de mesure améliorée et sans modification de la gestion et des changements institutionnels n'est pas une panacée* »<sup>113</sup>.

Le second levier consiste à augmenter le taux d'utilisation des serveurs en temps réel en fonction de la charge globale du data center en concentrant le traitement sur un nombre minimal d'équipements. Une telle optimisation du taux d'utilisation permet de mettre en veille les ressources non utilisées et ainsi de réduire la consommation énergétique du data center.

L'optimisation du taux d'utilisation des équipements nécessite une gestion dynamique des capacités disponibles rendue possible par un double mouvement de consolidation et de virtualisation des data centers et grâce à l'utilisation d'algorithmes.

Il conviendrait, au niveau européen de conduire des études pour analyser le niveau d'efficacité des data centers présents sur le continent et notamment la proportion de serveurs zombies et le taux d'utilisation des serveurs.

---

<sup>108</sup> Koomey J. et Taylor J. (2015), « New data supports finding that 30 percent of servers are 'Comatose', indicating that nearly a third of capital in enterprise data centers is wasted », Oakland, CA: Anthesis Group.

<sup>109</sup> Les auteurs obtiennent ces chiffres en se fondant sur l'évaluation d'IDC selon laquelle, en 2012, on comptait 35 millions de serveurs dans le monde.

<sup>110</sup> Koomey J. et Taylor J. (2017), « Zombie/comatose servers redux », Koomey Analytics et Anthesis.

<sup>111</sup> Les auteurs indiquent que c'est le cas de la vaste majorité des entreprises gérant des data centers.

<sup>112</sup> « *Many industry experts believe that virtualization is a silver bullet for achieving high server utilization* ».

<sup>113</sup> En anglais dans le texte : « *Virtualization without improved measurement technology and altered management and institutional changes is not a panacea* ».

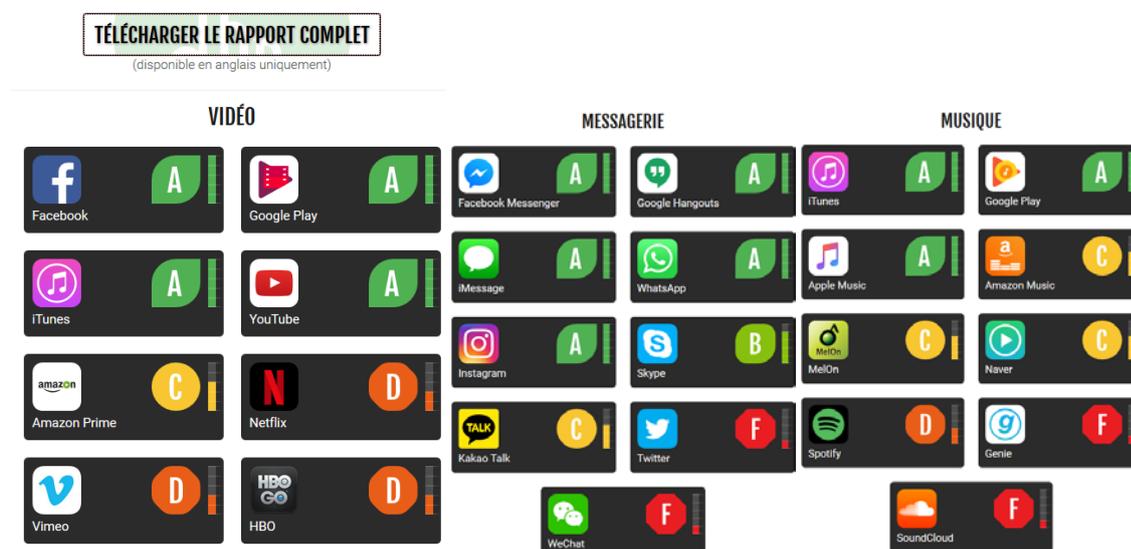
### 2.3. Alimenter les data centers en énergie renouvelable, une fausse bonne idée ?

En parallèle des travaux sur l'optimisation de la consommation énergétique des data centers, on constate que de nombreuses plateformes numériques, telles que Facebook, Apple et Google, ont engagé un chantier pour alimenter leurs data centers en énergie renouvelable.

**Figure 11 – Système de notation des services numériques en fonction de l'origine de l'énergie utilisée**

Vos apps sont-elles écolos? Découvrez si vos applications préférées tournent aux énergies propres ou polluantes.

Depuis 2010, Greenpeace pousse les géants du Net à alimenter leurs centres de données aux énergies renouvelables. Facebook et Google se sont déjà engagés. Qui seront les suivants ?



Source : Greenpeace

Dans son rapport *Clicking Clean*, Greenpeace dresse un état des lieux des annonces et de la réalité de cette bascule pour les principaux acteurs dans le monde et notamment pour les nouveaux acteurs asiatiques. L'ONG a développé un système de notation allant de A à F qui permet aux usagers de comparer les acteurs sur ce critère (Figure 11).

Si l'objectif d'une transition de l'industrie des data centers vers une énergie plus propre est en théorie louable, cette mesure ne permet cependant de réduire ni la demande totale en énergie du numérique, ni la pression exercée sur les matières premières<sup>114</sup>. Le potentiel des EnR n'étant pas illimité, l'objectif ne devrait pas être de faire du « gras vert », mais de supprimer les inefficacités en elles-mêmes.

<sup>114</sup> Métaux et énergie nécessaires à la fabrication des éoliennes et panneaux photovoltaïques et autres infrastructures permettant la génération d'énergie renouvelables.

## 2.4. Conclusion

Ces dernières années, le progrès technologique a permis une réelle optimisation de l'efficacité énergétique des data centers. Le mouvement de migration des usages des data centers internes des entreprises vers les data centers cloud ou hyperscale est à ce titre souvent perçu comme un levier pour réduire l'empreinte de ce secteur dans la mesure où les grands acteurs de l'internet disposent d'infrastructures récentes, dans lesquelles sont déployées les dernières solutions disponibles sur le marché. On note cependant que même dans les infrastructures les plus récentes, les efforts d'amélioration doivent être poursuivis notamment concernant le taux d'utilisation des équipements IT.

Malgré ces efforts réels de l'industrie, force est de constater que ces améliorations ont échoué à enrayer la croissance de la consommation énergétique des data centers : selon le Shift Project, leur consommation est ainsi passée de 300 TWh/an en 2013 à 600 TWh/an en 2017 et devrait continuer de croître à un rythme très soutenu dans les prochaines années.

Là encore, la démocratisation des usages qui accompagne cette transition technologique a largement dépassé les gains d'efficacité.



## Conclusion générale

L'étude de la consommation énergétique globale du numérique confirme bien que ce secteur consomme une quantité d'énergie très loin d'être négligeable pour alimenter sa croissance : 3 000 TWh par an en 2017, selon le Shift Project, et le double attendu en 2025. Si actuellement la production des équipements représente quasiment la moitié de la consommation énergétique du numérique et devrait en 2025 rester le premier poste de consommation, d'autres segments sont en train de monter. La consommation énergétique des data centers croît depuis 2013 à un taux annuel moyen de 16 %, qui devrait se maintenir jusqu'en 2025. Par ailleurs, concernant les réseaux télécoms dont le taux de croissance annuel moyen était relativement faible entre 2013 et 2017 (2,4 %), une forte reprise de la croissance annuelle de la consommation (supérieure ou égale à 10 % par an) est attendue sur la période 2017-2025.

La consommation énergétique du numérique est à l'origine d'émissions de gaz à effet de serre plus élevées que celles du secteur aérien (3,4 % des émissions totales de GES en 2017 et 7,6 % attendus en 2025). Cependant, ce n'est pas seulement le niveau de cette consommation énergétique qui est inquiétant, mais surtout la tendance haussière constatée ces dernières années (avec un taux de croissance annuel de 10 %) et qui devrait se prolonger à horizon 2025. Malgré ces deux indicateurs explosifs, le numérique demeure encore largement un secteur épargné par la critique et pour lequel la prise de conscience du caractère insoutenable de telles consommations se fait attendre. Au final, c'est donc l'accumulation de ces trois critères – un secteur parmi les plus énergivores, une croissance à contre-courant des objectifs que s'est fixés l'humanité et une absence de prise de conscience d'une responsabilité sectorielle – qui doit nous interpeller et guider les pouvoirs publics dans la définition de politiques de maîtrise des impacts environnementaux du numérique.

Concernant les crypto-monnaies reposant sur des blockchains publiques et des systèmes de preuves de travail (par exemple le Bitcoin), les différentes méthodes de calcul existantes évaluent la consommation énergétique entre 60 et 200 TWh par an en 2018. S'il convient de relativiser ces chiffres par rapport à la consommation totale du numérique évaluée à 3 000 TWh par an en 2017, on retiendra que les preuves de participation, alternative envisagée aux preuves de travail, constituent des systèmes de sécurisation beaucoup moins gourmands en énergie.

Concernant la consommation énergétique de l'internet des objets, un manque flagrant d'études est constaté, qui s'explique en grande partie par le caractère émergent de ces applications. On peut cependant tirer certaines conclusions des rares études existantes : d'une part, les équipements IoT constitueront à horizon 2030 la catégorie d'équipements dont la consommation devrait croître le plus, d'autre part, cette croissance devrait être essentiellement portée par la consommation liée aux fonctions de connexion des objets, tandis que la consommation amont dans les réseaux et les data centers devrait rester faible. La consommation induite par l'adjonction d'une fonction de connexion à de nombreux objets n'est

pas sans incidence sur l'évolution de la consommation globale du numérique et devrait, en conséquence, être étudiée.

De manière générale, s'il existe des études sur la consommation énergétique du numérique, on constate que ces études sont insuffisantes, car souvent anciennes, trop fragmentées et difficilement comparables, pour pleinement éclairer les pouvoirs publics sur les tendances et les moteurs de cette consommation. Il conviendrait donc de développer une recherche permettant de proposer des analyses récurrentes et cohérentes entre elles aux pouvoirs publics. Cette recherche devrait, certes, être conduite au niveau mondial, car c'est l'échelle qui permet de voir les effets complets du numérique, mais également au niveau européen afin de suivre les effets des éventuelles politiques mises en place en Europe pour maîtriser les impacts environnementaux du numérique. Au niveau mondial, l'Agence internationale de l'énergie (AIE) travaille depuis plusieurs années sur le sujet et pourrait éventuellement être mobilisée. Au niveau européen, un organisme existant tel que le Joint Research Center, qui a déjà travaillé sur le code de conduite relatif à l'efficacité énergétique des data centers, pourrait utilement centraliser le volet européen de ces analyses.

Le progrès technologique est souvent cité comme solution à cette croissance de la consommation énergétique du numérique.

Or, si le progrès technologique est réel sur le segment des réseaux télécoms, il ne constitue pas un moyen suffisant pour diminuer effectivement l'empreinte énergétique de ces réseaux. En effet, l'augmentation des débits disponibles, qui reste actuellement le principal objectif du progrès technologique, provoque par effet rebond une explosion du trafic internet, qui fait ré-augmenter la consommation. Cela ne signifie pas pour autant que les travaux d'optimisation de l'efficacité énergétique doivent être abandonnés. En effet, sans eux la consommation énergétique des réseaux exploserait. Comme l'explique l'AIE, « *la consommation directe d'énergie à long terme continuera à être un combat entre la demande croissante de données et l'amélioration de l'efficacité énergétique* »<sup>115</sup>. Pour cette raison, il conviendrait que la France et l'Europe veillent à stimuler le développement d'une offre de formation initiale et continue sur les techniques du « green for IT » afin que la France ne prenne pas de retard dans ce domaine.

De manière comparable, le progrès technologique a permis une réelle optimisation de l'efficacité énergétique des data centers ces dernières années. Le mouvement de migration des usages des data centers internes des entreprises vers les data centers cloud ou hyperscale est à ce titre souvent perçu comme un levier pour réduire l'empreinte de ce secteur dans la mesure où les grands acteurs de l'internet disposent d'infrastructures récentes, dans lesquelles sont déployées les dernières solutions disponibles sur le marché. On note cependant que même dans les infrastructures les plus récentes, les efforts d'amélioration doivent être poursuivis notamment concernant le taux d'utilisation des équipements IT. Malgré ces efforts réels de l'industrie, force est de constater que ces améliorations ont échoué à enrayer la croissance de la consommation énergétique des data centers : leur consommation est ainsi passée de 300 TWh/an en 2013 à 600 TWh/an en 2017 et devrait continuer de croître à un rythme très soutenu dans les prochaines années. Là encore, la démocratisation des

---

<sup>115</sup> En anglais dans le texte: « Direct energy use over the long run will continue to be a battle between data demand growth versus the continuation of efficiency improvements », Digitalization & Energy, AIE, 2017, p. 18.

usages qui accompagne cette transition technologique a largement dépassé les gains d'efficacité.

Au final, s'il existe bien une incitation économique, tant pour les opérateurs télécoms que pour les gestionnaires de data centers, à réduire la consommation énergétique de leurs infrastructures par l'adoption de nouvelles technologies plus efficaces énergétiquement, le progrès technologique ne suffit pas aujourd'hui, et ne suffira pas demain, à compenser les effets de l'augmentation exponentielle du trafic internet. Par ailleurs, l'explosion prévisible du nombre d'objets connectés devrait également engendrer un surcroît de consommation énergétique lié à leur production – même si de fortes incertitudes demeurent. Ce n'est qu'en acceptant de reconnaître l'impuissance de la seule technologie à atteindre les objectifs de maîtrise de la consommation énergétique du numérique, que seront développées les politiques publiques pertinentes, c'est-à-dire celles centrées sur les usages et l'écoconception.





RETROUVEZ  
LES DERNIÈRES ACTUALITÉS  
DE FRANCE STRATÉGIE SUR :



[www.strategie.gouv.fr](http://www.strategie.gouv.fr)



[@Strategie\\_Gouv](https://twitter.com/Strategie_Gouv)



[france-strategie](https://www.linkedin.com/company/france-strategie)



[FranceStrategie](https://www.facebook.com/FranceStrategie)



[@FranceStrategie\\_](https://www.instagram.com/FranceStrategie_)



[StrategieGouv](https://www.youtube.com/StrategieGouv)



**FRANCE STRATÉGIE**

---

Institution autonome placée auprès du Premier ministre, France Stratégie contribue à l'action publique par ses analyses et ses propositions. Elle anime le débat public et éclaire les choix collectifs sur les enjeux sociaux, économiques et environnementaux. Elle produit également des évaluations de politiques publiques à la demande du gouvernement. Les résultats de ses travaux s'adressent aux pouvoirs publics, à la société civile et aux citoyens.

---

FRANCE STRATÉGIE – 20, AVENUE DE SÉGUR – TSA 90725 – 75334 PARIS CEDEX 07 – TÉL. 01 42 75 60 00