

# HAUT CONSEIL pour le CLIMAT

Déploiement de la 5G en France :  
Quel impact sur la consommation d'énergie et  
l'empreinte carbone ?

The logo for Citizing features the word "Citizing" in a white, lowercase, sans-serif font. Above the letters, a series of white dashed lines form a stylized, wavy pattern that resembles a signal or a network path, starting from the 'i' and ending above the 'g'.

Citizing



## AVERTISSEMENT

Les résultats de l'étude reflètent uniquement les travaux de CITIZING et Virtus Management, et n'engagent en aucun cas le Haut Conseil pour le Climat.

Pour citer l'étude, les éléments suivants doivent apparaître :

« Déploiement de la 5G en France : Quel impact sur la consommation d'énergie et l'empreinte carbone ? », CITIZING pour le Haut Conseil pour le Climat, décembre 2020

Toute reproduction sans respect de cette mention est interdite.

Les parties intéressées sont invitées à faire part de leurs commentaires aux auteurs de ce rapport.

### Auteurs correspondants, par ordre alphabétique

Julie de Brux (julie.debrux@citizing-consulting.com)

Hugues Ferreboeuf (h.ferreboeuf@virtus-management.com)

Louis Guillet (louis.guillet@citizing-consulting.com)

Charles-Elie Laly (charles-elie.laly@citizing-consulting.com)

## REMERCIEMENTS

Le groupement CITIZING & Virtus Management remercie les personnes suivantes d'avoir accepté d'être auditionnées ou de répondre à l'écrit aux sollicitations dans le cadre de la présente mission :

- Arcep :  
Madame Cécile DUBARRY  
Monsieur Patrick LAGRANGE  
Madame Anne-Lise THOUROUDE  
Monsieur Laurent TOUSTOU
- ANFR :  
Monsieur Jean-Pierre LUGERN
- Bouygues Télécom :  
Monsieur Fabrice BONNIFET
- Nokia :  
Madame Florence DOSSOGNE  
Madame Soizick LAMANDE D'ALOIA
- SFR :  
Madame Claire PERSET
- Tactis :  
Monsieur Pierre BOUVIER  
Monsieur Julien RENARD

La mission remercie également les personnes suivantes pour leurs réponses en audition par le Haut Conseil pour le Climat et sur lesquelles la présente étude s'est appuyée :

- Arcep :  
Monsieur Sébastien SORIANO
- Ericsson :  
Monsieur Viktor ARVIDSSON

Malgré plusieurs relances, la mission n'a pu obtenir d'audition auprès des opérateurs réseau Orange et Free, ni du constructeur Samsung.

## TABLE DES MATIERES

<b>AVERTISSEMENT</b>	<b>3</b>
<b>REMERCIEMENTS</b>	<b>4</b>
<b>RESUME</b>	<b>6</b>
<b>CHAPITRE 1 : HISTORIQUE, PERIMETRE ET METHODE</b>	<b>8</b>
1. HISTORIQUE DES RESEAUX DE TELECOMMUNICATION	9
2. QUELQUES ELEMENTS TECHNIQUES SUR LES RESEAUX DE TELECOMMUNICATION	12
3. RESEAUX ET USAGES NUMERIQUES	16
4. PERIMETRE D'ETUDE	19
5. ÉLEMENTS METHODOLOGIQUES GENERAUX	27
<b>CHAPITRE 2 : DEFINITION DES SCENARIOS ET DE LEURS VARIANTES</b>	<b>32</b>
1. LE SCENARIO DE DEPLOIEMENT DE LA 5G	33
1.1. <i>La variante « 5G du cahier des charges » (variante 2)</i>	35
1.2. <i>La variante « vraie 5G pour tous » (variante 1)</i>	35
1.3. <i>La variante « 5G sélective » (variante 3)</i>	36
2. SCENARIO DE NON-DEPLOIEMENT	37
<b>CHAPITRE 3 : PARAMETRES ET HYPOTHESES DU MODELE</b>	<b>38</b>
1. HYPOTHESES SUR LES RESEAUX	39
1.1. <i>Maillage</i>	39
1.2. <i>Trafic de données</i>	44
1.3. <i>Consommation par site</i>	45
1.4. <i>Energie et émissions en phase amont</i>	48
2. HYPOTHESES SUR LES DATACENTERS	49
3. HYPOTHESES SUR LES TERMINAUX	52
4. FACTEURS D'EMISSIONS	63
4.1. <i>Intensité carbone de l'électricité consommée en France</i>	63
4.2. <i>Intensité carbone de l'électricité consommée à l'étranger</i>	64
4.3. <i>Intensité carbone de l'énergie primaire dans le monde</i>	64
<b>CHAPITRE 4 : RESULTATS PAR SCENARIO</b>	<b>66</b>
1. SCENARIO DE DEPLOIEMENT	67
1.1. <i>Les réseaux</i>	67
1.2. <i>Les datacenters</i>	69
1.3. <i>Les terminaux</i>	70
1.4. <i>Synthèse du scénario de déploiement</i>	72
2. SCENARIO DE NON-DEPLOIEMENT	73
2.1. <i>Les réseaux</i>	73
2.2. <i>Les datacenters</i>	74
2.3. <i>Les terminaux</i>	76
2.4. <i>Synthèse du scénario de non-déploiement</i>	78
<b>CHAPITRE 5 : COMPARAISONS ENTRE LE DEPLOIEMENT ET LE NON-DEPLOIEMENT DE LA 5G ET MISES EN PERSPECTIVE</b>	<b>79</b>
1. COMPARAISON DE LA CONSOMMATION D'ENERGIE PRIMAIRE	80
2. COMPARAISON DE LA CONSOMMATION D'ELECTRICITE EN FRANCE	84
3. COMPARAISON DES EMISSIONS DE GAZ A EFFET DE SERRE	87
<b>TABLES DES ILLUSTRATIONS</b>	<b>95</b>
FIGURES	96
GRAPHIQUES	96
TABLEAUX	98
<b>BIBLIOGRAPHIE</b>	<b>99</b>

## RESUME

La présente étude s'est attachée à estimer **l'empreinte énergétique et l'empreinte carbone du déploiement de la 5G en France à horizon 2030**. Si les réseaux numériques constituent l'épine dorsale de ce déploiement, ils ne sauraient être étudiés seuls. En effet, avec l'avènement de la 5G, ce sont non seulement les **réseaux**, mais également les **centres de données (datacenters)** et les **terminaux numériques** qui devraient évoluer, et avec eux, l'empreinte énergétique et carbone. L'étude tient donc compte de ces trois « sous-ensembles » constitutifs du numérique, et elle considère les deux phases les plus importantes du cycle de vie de ces sous-ensembles numériques : la phase amont (production, acheminement, etc.) et la phase utilisation.

Conformément aux bonnes pratiques évaluatives, une méthode différentielle est mise en œuvre. En d'autres termes, elle **compare un scénario de déploiement de la 5G relativement à un scénario de non-déploiement**. Cette méthode permet d'une part de tenir compte de la vraisemblable évolution de l'empreinte carbone, même en cas de non-déploiement de la 5G ; et d'autre part de mettre en évidence les différentiels d'impacts énergétiques et environnementaux, utiles à la décision publique.

Dans la perspective de cette analyse différentielle, deux scénarios ont été modélisés : un scénario de déploiement de la 5G et un scénario de non-déploiement. Comme dans toute étude prospective, ces scénarios sont entourés d'incertitudes. Des variantes de chaque scénario ont été modélisées pour encadrer certaines incertitudes. Les variantes du scénario de déploiement posent ainsi des hypothèses différenciées sur le maillage du réseau 5G sur le territoire français, mais également sur l'adoption de terminaux numériques émergents, comme les modules de connexion nécessaires au développement de l'Internet des objets (*IoT*, pour *Internet of Things*). L'incertitude porte aussi sur le taux de croissance du volume de données échangées, ainsi que sur la localisation et la taille des *datacenters*.

Les variantes du scénario de déploiement sont au nombre de trois : la variante centrale, « La 5G du cahier des charges » respecte et prolonge les obligations de déploiement posées par le régulateur pour l'attribution des bandes de fréquence 5G ; la variante haute, « La 5G pour tous » modélise un déploiement dense de la 5G sur l'ensemble du territoire ; tandis que la variante basse, « La 5G sélective », se limite à désengorger les zones prochainement saturées en 4G. Le scénario de non-déploiement est constitué de deux variantes qui forment un intervalle de confiance autour d'incertitudes technico-économiques, telles que la vitesse de saturation du réseau 4G et les impacts sur le trafic de données.

Les résultats saillants peuvent être résumés comme suit :

La hausse de **consommation d'énergie primaire** du secteur numérique à horizon 2030, plus ou moins marquée selon les scénarios, est générale : elle concerne la phase amont comme la phase utilisation, la France comme l'étranger.

Les résultats relatifs à la **consommation d'électricité** ne portent que sur la France, et concernent essentiellement la phase utilisation. Actuellement, le numérique représente 10% de la consommation française totale d'électricité pour une consommation de 44,3 TWh. Quel que soit le scénario, les résultats du modèle pointent vers une augmentation de la consommation liée au numérique : +10% de consommation d'électricité, même en cas de non-déploiement à horizon 2030 ; +20% pour la variante sélective du scénario de déploiement, +50% pour la variante intermédiaire et un doublement dans la variante haute du scénario de déploiement.

Cette estimation est mise en perspective de la Programmation Pluriannuelle de l'Électricité (PPE) qui table sur une baisse de 20% de la consommation du secteur. L'écart entre la projection de la PPE et l'estimation réalisée dans la présente étude dans la variante centrale du scénario de déploiement de la 5G s'élève à 31,6 TWh. C'est l'équivalent de la production électrique annuelle moyenne de plus de 5 réacteurs nucléaires de 900 MWh. Pour répondre à cette hausse d'électricité, il faudrait soit l'importer (électricité probablement plus carbonée), soit construire de nouvelles installations et infrastructures de production électrique.

Enfin, la hausse de **l'empreinte carbone** liée au numérique, aujourd'hui estimée à 15 MtCO<sub>2</sub>eq, paraît inéluctable à horizon 2030, que la 5G soit déployée au non. Selon l'intensité du déploiement de la 5G, l'empreinte carbone pourrait croître de 20 à 55% entre 2020 et 2030. En 2030, l'écart entre la variante intermédiaire du scénario de déploiement et le scénario de non-déploiement s'élève à 3 millions de tonnes de CO<sub>2</sub>. Avec le passage à la 5G, si la France respecte malgré cela ses engagements relatifs à la limitation du réchauffement climatique, le numérique, qui représente actuellement 2% de l'empreinte carbone de la France, pourrait en représenter plus de 4% à horizon 2030.



# **Chapitre 1 : Historique, périmètre et méthode**



## 1. Historique des réseaux de télécommunication

Les réseaux de télécommunication sont les canaux de transport des données numériques. Les réseaux peuvent être de deux natures : ils sont soit mobiles, comme c'est le cas de la 2G, de la 3G, de la 4G, de la 5G et de la future 6G ; soit fixes, comme c'est le cas du filaire et du wifi.

### Les réseaux mobiles

Actuellement, quatre générations de réseaux mobiles sont ou ont été actives en France :

- La 1<sup>ère</sup> génération (« 1G ») a été déployée dans les années 80. Contrairement aux générations suivantes dont les signaux radio sont numériques, la 1G utilise des normes de télécommunications analogiques pour les communications vocales en situation de mobilité.
- La 2<sup>e</sup> génération, communément appelée « 2G », a été lancée dans les années 90. Cette génération mobile donne pour la première fois la possibilité aux échanges vocaux et de texte d'être réalisés de façon numérique, c'est-à-dire au travers de codes (par exemple binaires). Alors que les télécommunications analogiques consistaient en transcriptions et amplifications directes d'ondes comme la voix, le déchiffrement des télécommunications numériques permet de véhiculer des informations d'une plus vaste nature (ex : textes). Cette transition technologique est comparable à celle du disque vinyle et des cassettes vers le disque compact (*compact disc*, CD).
- La 3<sup>e</sup> génération, nommée « 3G », a été commercialisée en France à partir de 2004. Cette génération donne accès à Internet, mais de façon limitée. En effet, la connexion internet permet l'échange d'images et de photos mais le débit limité ne permet pas aux utilisateurs d'accéder aux contenus vidéos par exemple.
- La 4<sup>e</sup> génération, la « 4G », a été commercialisée à partir de 2011 en France. Cette génération mobile améliore la qualité de service en proposant un débit accru et une diminution de la latence. Grâce à ses performances, la 4G permet de généraliser l'accès à des contenus vidéos et à des applications mobiles. Notamment, les performances de la 4G offrent la possibilité aux abonnés d'accéder à des vidéos en streaming.

A très courte échéance et à plus longue échéance, deux autres générations mobiles seront déployées et ajoutées au réseau français :

- La 5<sup>e</sup> génération (5G) a été déployée pour la première fois en Avril 2019 en Corée du Sud. En Europe, le premier pays à l'avoir déployée est la Suisse, quelques jours après la Corée du Sud. Malgré les perturbations provoquées par le confinement lié à la pandémie covid-19, la 5G a été commercialisée à la fin de l'année 2020 en France. La nouvelle génération mobile permettra d'améliorer la qualité du service mobile. En effet, il est attendu de la 5G une hausse importante du débit utilisateur, une diminution de la latence et une augmentation de la densité d'objets pouvant être connectés dans un périmètre donné. Au départ, le déploiement sera limité à l'échelle

de villes<sup>1</sup>, c'est-à-dire que seule la population urbaine pourra profiter des hautes performances attendues de la 5G. Par la suite, le déploiement devrait se poursuivre pour assurer *a minima* le niveau de couverture imposé par le cahier des charges publié par l'ARCEP, à la fois dans les zones de haute et de faible densité de population. Ce déploiement s'appuiera sur l'exploitation de plusieurs bandes de fréquence<sup>2</sup> (700 MHz, 3,5 GHz, 26 GHz), chacune ayant des caractéristiques différentes : plus la fréquence est élevée, plus le débit potentiel est important et plus la portée du signal (donc la couverture) est faible.

- La 6<sup>e</sup> génération n'a pas encore été déployée. Toutefois, les équipementiers ont débuté les recherches. Les experts évoquent un début de déploiement aux alentours de 2030<sup>3</sup>. Il est évoqué un déploiement de la 6G sur les bandes de fréquences térahertz (100 GHz à 30 THz), permettant notamment d'atteindre des débits 100 fois supérieurs à ceux de la 5G<sup>4</sup>.

Les différentes générations mobiles décrites ci-dessus ont été et seront déployées progressivement sur le territoire. Généralement, le déploiement se fait dans les zones très denses puis dans les zones denses et enfin dans les zones moins denses (cf. chapitre 3 partie « Hypothèses sur les réseaux

» pour la description des trois zones). En effet, les opérateurs ont intérêt à couvrir les zones où le retour sur investissement potentiel est le plus important, c'est-à-dire là où le nombre d'abonnés théorique est le plus grand. Les zones non couvertes par une ou plusieurs générations mobiles sont appelées « zones blanches<sup>5</sup> ». Afin de réduire les fractures territoriales, plusieurs programmes, tel que « Zones blanches – centres bourgs », ont pour objectif la résorption totale de ces zones. Par exemple, en novembre 2020, l'Arcep (Autorité de régulation des communications électroniques et des postes), c'est-à-dire le régulateur des Télécoms en France, a annoncé que 96% du territoire était couvert en 4G par au moins un opérateur et 76% par les quatre opérateurs<sup>6</sup>. Au 4<sup>e</sup> trimestre 2019, le niveau de couverture 4G est représenté ci-dessous sur la Figure 1. Les parties blanches correspondent aux zones non-couvertes. On observe que ces zones sont surreprésentées dans la « diagonale du vide<sup>7</sup> », illustrant en partie la fracture territoriale que connaît ce territoire.

<sup>1</sup>Le 20 novembre 2020, SFR a ouvert à Nice le premier réseau 5G grand public. D'après l'opérateur, 50% de la population niçoise est couverte par la nouvelle génération mobile.

<sup>2</sup> Une génération mobile peut exploiter plusieurs bandes de fréquence. Une bande de fréquence peut être utilisée par différentes générations au cours du temps. Par exemple, la bande 900MHz servait à l'origine à la 2G puis les opérateurs ont été autorisés à l'utiliser pour la 3G.

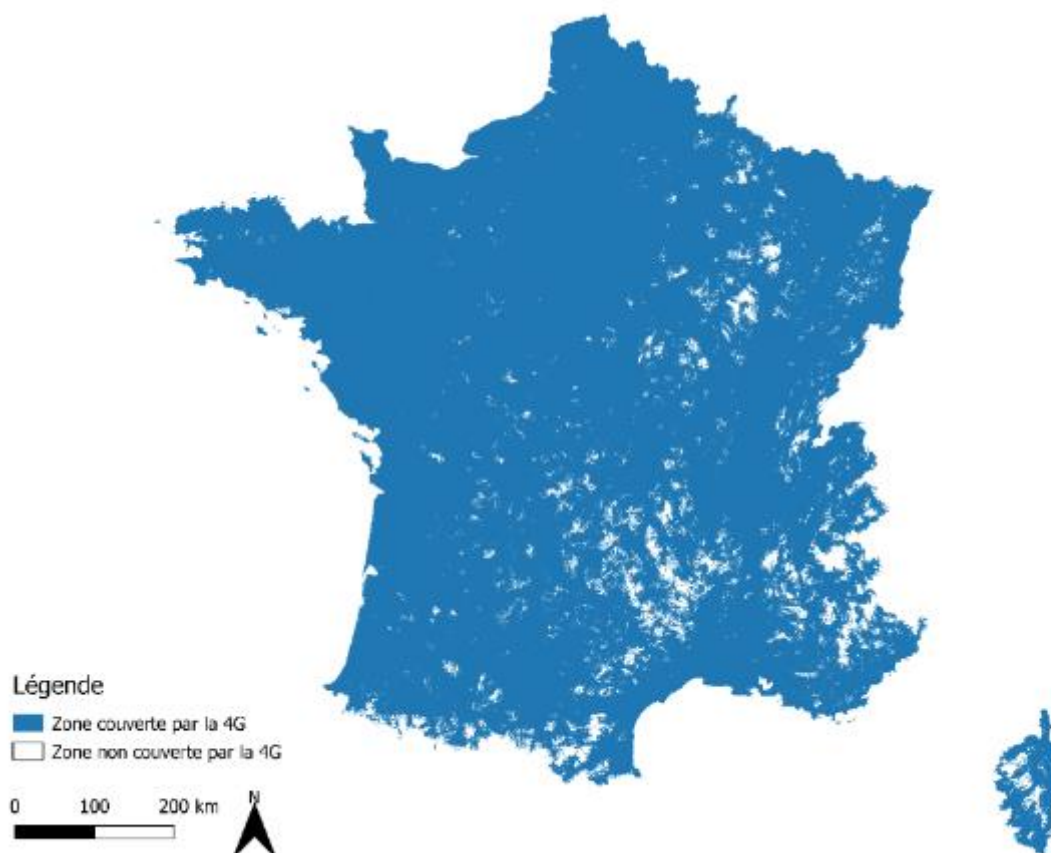
<sup>3</sup> « [La 5G arrive en France – et la 6G, alors ?](#) », Numerama (2020)

<sup>4</sup> « [6G : Samsung compte lancer le successeur de la 5G dès 2028](#) », Phonandroid (2020)

<sup>5</sup> « [La couverture des zones peu denses](#) », Arcep (2020)

<sup>6</sup>« [Très haut débit : la France est désormais couverte à 96% en 4G](#) », Le Figaro (2020)

<sup>7</sup> « [Diagonale des faibles densités](#) », Géoconfluence (2017)



*Figure 1. Couverture 4G de la France métropolitaine au 4e trimestre 2019  
(source : mission à partir de données de l'Arcep)*

## **Le réseau fixe**

Dans le cadre de ce document, le réseau fixe désigne à la fois les réseaux filaires et les réseaux wifi.

Les réseaux filaires sont constitués :

- d'un cœur de réseau, ensemble d'artères de fibre optique reliant des routeurs aiguillant et traitant les flux massifs de données (le « trafic ») qui y transitent ; ce cœur de réseau domestique est lui-même interconnecté avec d'autres cœurs de réseaux étrangers afin de faire transiter le trafic international.
- de réseaux d'accès irrigant les lieux d'habitation, les immeubles de bureaux, les campus industriels ou universitaires ; ils s'appuient sur des infrastructures en cuivre (ADSL) ou, de plus en plus, en fibre optique et sont accessibles par l'utilisateur via un équipement d'extrémité (notamment les boxes des opérateurs).
- D'une couche intermédiaire, dite réseau de collecte, permettant d'agréger les flux issus des réseaux d'accès et de les transférer au cœur de réseau, et, symétriquement, d'acheminer les flux issus du réseau de collecte vers les réseaux d'accès

Les réseaux wifi assurent une couverture locale radio au moyen de bornes wifi, auxquelles se connectent des utilisateurs en mobilité réduite (au sein de la zone couverte). Les bornes

wifi sont elles-mêmes connectées au réseau filaire d'accès. Les boxes des opérateurs regroupent au sein du même équipement les fonctions de borne wifi et d'interface au réseau filaire d'accès.

## 2. Quelques éléments techniques sur les réseaux de télécommunication

Les réseaux de télécommunication sont constitués d'un ensemble d'appareils, équipements et infrastructures. Ils forment un système complexe régis par des protocoles de communication. Des interactions communes sont représentées schématiquement ci-dessous (cf. Figure 2).

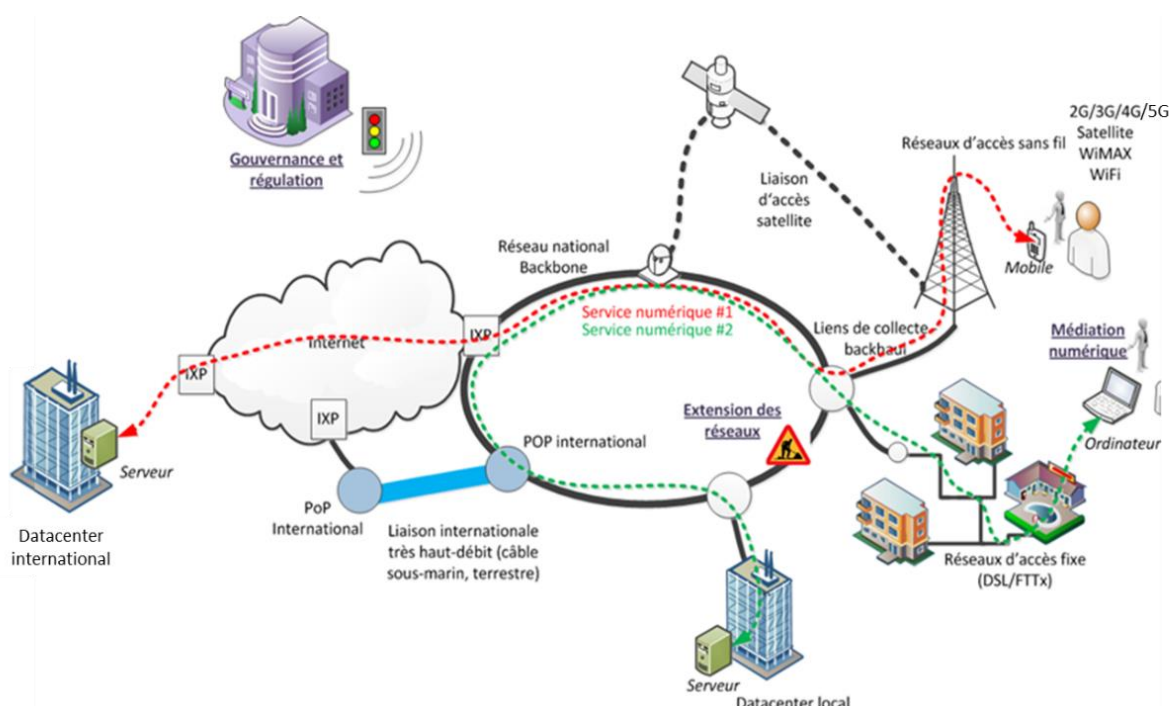


Figure 2. Schéma des réseaux de télécommunication et des interactions entre composantes (source : AFD, 2020)

Chaque génération de réseau implique une amélioration de la qualité de service proposée aux utilisateurs. Elle comprend notamment :

- Le *débit utilisateur*, c'est-à-dire la quantité de données numériques transmises par unité de temps. Généralement, l'unité de temps est la seconde et la quantité de données est exprimée en kilobit par seconde (kbit/s), en mégabit par seconde (Mbit/s) ou, pour les générations les plus récentes, en gigabit par seconde (Gbit/s)<sup>8</sup> ;

<sup>8</sup> Un bit est l'unité la plus petite d'information en code binaire : 0 ou 1. Il existe aussi une autre unité appelée « byte » en anglais, qui agrège plusieurs bits, typiquement 8, d'où le nom français d'octet. Les données de trafic à l'échelle française dans la présente étude sont exprimées en Exaoctets (EB, pour *Exabytes*).

- La *latence*, c'est-à-dire le délai de transit entre le moment où une donnée est envoyée et le moment où elle est reçue. La latence est exprimée en milliseconde (ms) ;
- La *densité*, c'est-à-dire le nombre d'objets pouvant être connectés dans un périmètre donné, généralement dans un kilomètre carré.

Comme présenté dans le Tableau 1, les gains de performance sont importants entre les générations et au sein même des générations mobiles avec les améliorations qu'elles connaissent. Par exemple, au lancement de la 3G le débit théorique ne dépassait pas 0,3 Mbit/s. Grâce aux évolutions successives et à la technologie DC-HSPA+, le débit maximum est désormais de 42 Mbit/s, soit multiplication par 140 du débit théorique.

Génération mobile	Abréviation	Technologie	Débits		Latence	Densité (terminal par km <sup>2</sup> )
			Max	Typical		
2G	G	GPRS	0.1Mbit/s	<0.1Mbit/s	500ms (0,5")	
	E	EDGE	0.3Mbit/s	0.1Mbit/s	500ms (0,5")	
3G	3G	3G (Basic)	0.3Mbit/s	0.1Mbit/s	100ms (0,1")	
	H	HSPA	7.2Mbit/s	1.5Mbit/s	100ms (0,1")	
	H+	HSPA+	21Mbit/s	4Mbit/s	100ms (0,1")	
	H+	DC-HSPA+	42Mbit/s	8Mbit/s	100ms (0,1")	
4G	4G	LTE Category 4		15Mbit/s	60ms (0,06")	100 000
4G+	4G+	LTE-Advanced Cat6	300Mbit/s	30Mbit/s	30ms (0,03")	
	4G+	LTE-Advanced Cat9	450Mbit/s	45Mbit/s	30ms (0,03") ?	
	4G+	LTE-Advanced Cat12	600Mbit/s	60Mbit/s	30ms (0,03") ?	
	4G+	LTE-Advanced Cat16	979Mbit/s	90Mbit/s	30ms (0,03") ?	
5G	5G	5G	1,000-10,000Mbit/s (1-10Gbit/s)	150-200Mbit/s	1ms (0,001")	1 000 000

Tableau 1. Mesures de performance par génération de réseau mobile et technologie

Chaque génération mobile implique la mise en service par les opérateurs de sites radio, permettant aux populations couvertes de se connecter au réseau nouvellement installé<sup>9</sup>. Ces installations sont composées :

- D'un pylône, aussi appelé « mat », permettant aux antennes d'être installées en hauteur ;
- D'une ou plusieurs antennes ;

<sup>9</sup> A noter que pour se connecter au réseau mobile, les utilisateurs doivent avoir un terminal et un abonnement compatibles avec le réseau. Par exemple, pour accéder au réseau 5G il faudra être équipé d'un smartphone compatible avec cette génération mobile.

- De divers équipements actifs permettant de transmettre les signaux radio, de gérer les communications et les terminaux se connectant au site, ainsi que d'assurer un approvisionnement électrique aux caractéristiques idoines.

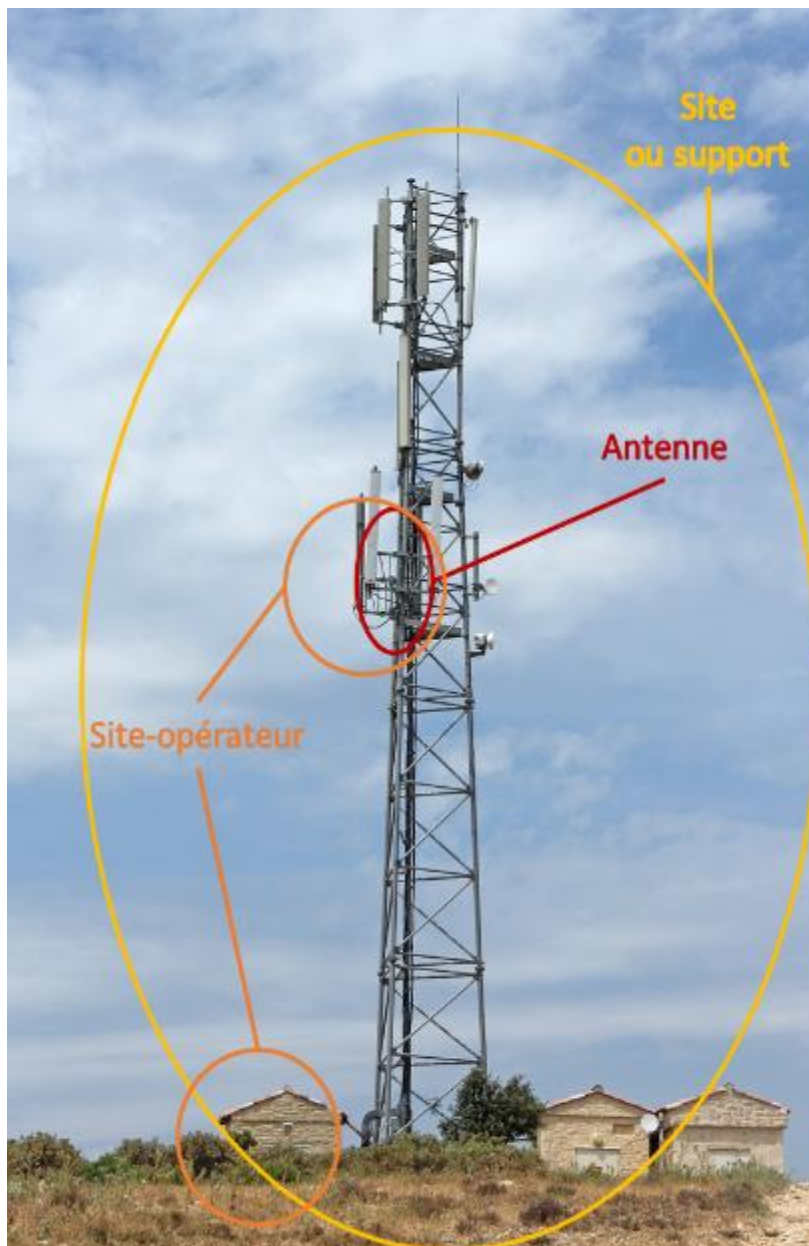
L'Agence National des Fréquences Radio (ANFR) comptabilise de trois façons différentes le parc des équipements et des installations mobiles.

Tout d'abord, l'ANFR comptabilise les « *supports* », c'est-à-dire l'ensemble des installations regroupées à un endroit donné, sur et autour d'un pylône. Les supports sont soit financés par un opérateur et ceux qui souhaitent y installer des antennes doivent payer une redevance ; soit cofinancés par des opérateurs. Dans ce dernier cas de figure, les opérateurs se répartissent les coûts fixes et variables d'installation et d'entretien. Un support peut accueillir plusieurs opérateurs, plusieurs antennes et plusieurs générations mobiles. En novembre 2020, le nombre de supports 4G en service sur le territoire métropolitain est estimé à 46 317. A noter que l'Autorité de régulation des communications électroniques, des postes (Arcep) utilise le terme « site » à la place de « support ». Ces deux termes sont similaires et définissent le même ensemble.

Ensuite, l'ANFR comptabilise les « *sites-opérateurs* », c'est-à-dire les points de présence des équipements actifs des opérateurs par génération (2G, 3G, 4G et 5G). Puisqu'un support peut constituer un point de présence pour plusieurs opérateurs, le nombre de sites-opérateurs est supérieur au nombre de supports. Toujours en novembre 2020 et sur le territoire métropolitain, l'ANFR estime le nombre de sites-opérateurs 4G en service à 82 572 et le nombre de sites-opérateurs 2G à 59 127. Dans le cahier des charges d'attribution de la 5G (bande 3,5 GHz), l'Arcep utilise les sites-opérateurs pour définir des obligations de déploiement.

Enfin, l'ANFR comptabilise les *antennes*. Un site peut être équipé de plusieurs antennes de générations différentes et être exploité par divers opérateurs. En novembre 2020, le nombre d'antennes en service, toutes générations confondues, s'élève à 417 266 sur le territoire métropolitain. Plus spécifiquement, le nombre d'antennes 4G en service est de 204 466.

Ces trois façons de comptabiliser les installations sont représentées de façon schématique ci-dessous (cf. Figure 3). Le site-opérateur inclut des équipements électriques et potentiellement plusieurs antennes.



*Figure 3. Schéma d'illustration des sites, sites-opérateurs et antennes*

### 3. Réseaux et usages numériques

Les réseaux de télécommunications constituent l'épine dorsale sur laquelle repose ce qu'il convient d'appeler l'écosystème numérique. La connexion à une vaste échelle d'une multitude de machines (et à travers elles d'individus, d'organisations, etc.) a créé un milieu – l'internet, ou plus largement le cyberspace – où de nouvelles formes d'interactions et d'usages apparaissent. Ces nouvelles interactions, qualifiées de virtuelles, mais s'appuyant pourtant sur des infrastructures très matérielles transforment toutes les sphères de la société. La transition numérique désigne ces transformations.

Les générations de réseaux mobiles marquent certaines étapes le long de la transition numérique. La 4G a constitué un saut technologique permettant notamment aux individus en mobilité d'avoir une connexion fiable et haut débit à internet. La 5G promet d'être l'étape de l'internet des objets (IoT).

L'internet des objets fait référence aux objets et machines nouvellement connectés, donc dont la fonction primaire n'est ni le traitement ni le stockage ni le transport de l'information, qui occuperaient une place croissante dans les télécommunications. Les machines peuvent soit communiquer avec l'utilisateur soit entre elles (*machine to machine*, M2M). Les communications M2M se situent plutôt en amont des chaînes de valeur, dans l'industrie, d'où le terme d'internet industriel des objets (IIoT). Aussi, la révolution promise par la 5G consiste surtout à réunir l'amont et l'aval des chaînes de valeur au travers de connexions sectorielles ou « verticales » (*vertical industries*). Par exemple, un fabricant de radiateurs désormais connectés pourra obtenir des données sur l'utilisation de ses appareils et développer de nouveaux services. L'architecture du réseau 5G est conçue pour favoriser les télécommunications « verticales » selon le groupe de standardisation 5GPPP<sup>10</sup>, notamment grâce à la virtualisation des réseaux et à des techniques comme le *network slicing* (la segmentation des ressources du réseau) pour offrir des services de connexion personnalisés.

A présent, le marché de la connexion mobile peut se résumer comme la conjonction de trois offres : l'offre d'électricité, l'offre d'accès à un réseau de télécommunications et l'offre de terminaux comme par exemple les smartphones (cf. Figure 4). Une même société peut assurer plusieurs rôles, comme celui d'opérateur réseau et celui de fournisseur d'accès à internet (FAI), ou comme la fabrication d'équipements de réseaux et de terminaux.

Le numérique abrite d'autres familles de marché que la connexion à internet. Matinmikko *et al.* (2017) définissent également les catégories de la fourniture de contenu, de la valorisation de données de contexte (ex : données sur les utilisateurs pour la publicité ciblée) et de la facilitation du commerce en ligne.

<sup>10</sup> 5GPPP Architecture Working Group, "View on 5G Architecture", White paper (Février 2020),



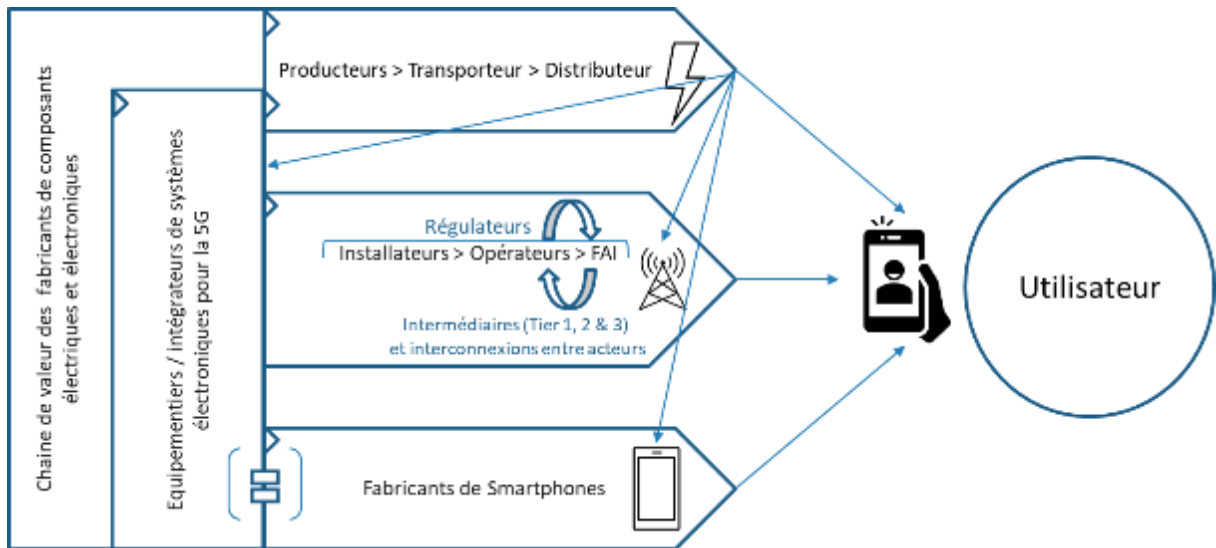


Figure 4. Schéma de la chaîne de valeur pour la fourniture d'accès mobile à internet (source : Citizing, 2020)

La 5G pourrait contribuer à changer l'organisation des rôles au sein de l'offre d'accès aux réseaux de télécommunications. 5GPPP y définit sept rôles des parties prenantes privées (cf. Figure 5, avec le même code couleur) :

- Les clients des services de connexion (particuliers comme professionnels, dont notamment les « verticales »)
- Les fournisseurs de services de connexion (accès traditionnel, spécialisés par verticale et *Network Slice as a Service*)
- Les opérateurs des infrastructures de réseaux
- Les fournisseurs de services d'infrastructure virtualisée (conception et mise en œuvre de la virtualisation des ressources de communication et calcul sur les réseaux)
- Les opérateurs de datacenters (fournisseurs de capacités de stockage et de calcul)
- Les fournisseurs de logiciels et d'équipements à destination de l'ensemble des parties prenantes déjà évoquées
- Les consultants pour l'ensemble des parties prenantes déjà évoquées

Des parties prenantes pourraient endosser plusieurs rôles et ainsi prendre une place plus grande dans leur orchestration, ce qui explique les espoirs et les craintes des acteurs en place face à ces possibilités de disruption des positions établies.

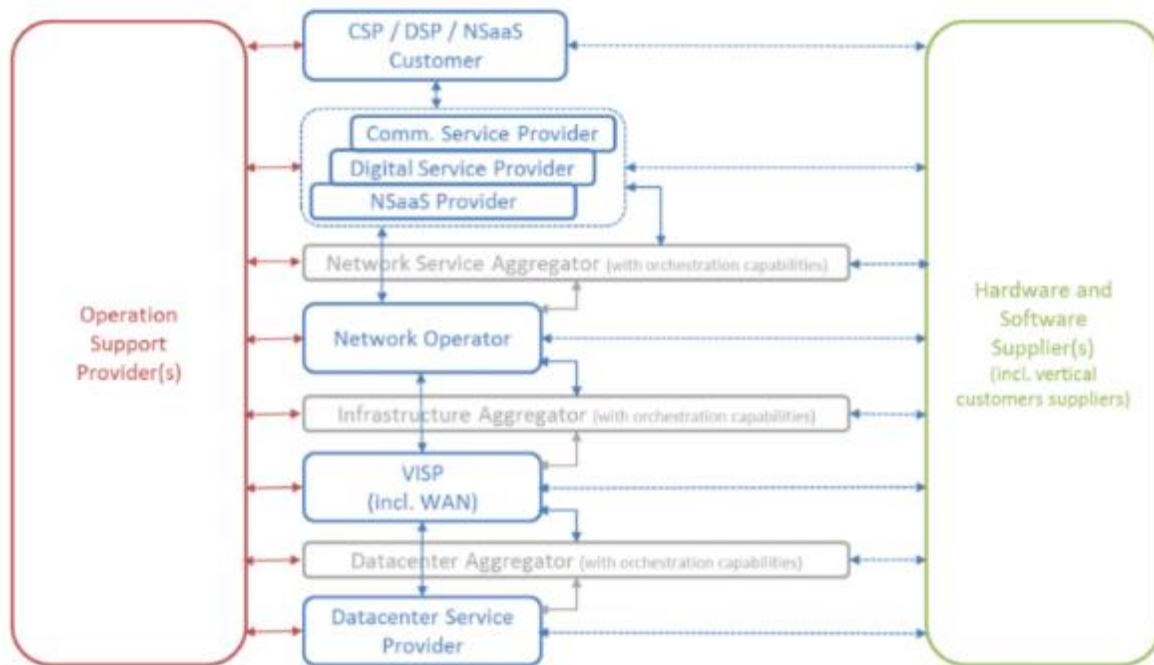


Figure 5. Schéma des rôles des parties prenantes du réseau 5G  
(Source : 5GPPP Architecture Working Group, 2020)

La valeur ajoutée du secteur numérique en France a augmenté d'environ 4% par an ces dernières années selon le Syntec<sup>11</sup>. L'année 2020 devrait être marquée par un recul prononcé du secteur (-6,7%) en raison de la crise économique qui fait suite aux mesures de lutte contre la pandémie covid-19. Toujours selon le Syntec, les entreprises fournissant des services numériques aux autres secteurs (automobile, aéronautique...) sont particulièrement touchées. Au contraire, d'autres pans d'activité du secteur numérique restent en croissance, comme le *cloud* (stockage et traitement de données confiés à des tiers), les réseaux sociaux et l'analyse de données (le « contexte » selon la typologie évoquée plus haut). L'essor continu du *cloud* est particulièrement intéressant pour la présente étude puisqu'il sous-tend une partie de la migration (en proportion) du stockage et du traitement de données depuis des serveurs en propre vers des datacenters gérés par des tiers. Cette tendance augmente par ailleurs le trafic sur les réseaux publics.

Les réseaux télécoms et les usages numériques sont ainsi en pleine expansion. Leurs dynamiques respectives sont intrinsèquement liées :

- Les entreprises des réseaux anticipent de nouveaux usages au regard des tendances émergentes
- Sur la base de ces anticipations, elles planifient et effectuent des investissements pour configurer et calibrer l'infrastructure en tirant parti des nouvelles technologies
- L'offre de nouveaux services de connexion, puis par extension de contenu, de contexte et de commerce en ligne se met en place et des services correspondant aux nouveaux usages anticipés sont promus de façon à rentabiliser les investissements effectués
- Les utilisateurs s'approprient les nouveaux services, puis de nouveaux usages peuvent émerger, et ainsi de suite.

L'innovation technologique dans le domaine des réseaux se traduit par une baisse des coûts unitaires et de forts gains d'efficacité énergétique. Or c'est précisément dans ce

<sup>11</sup>« [Bilan 2019 et perspectives 2020 du secteur numérique](#) », Syntec (2020)

contexte que survient l'effet rebond. Les gains d'efficacité des équipements numériques ne provoquent ainsi pas nécessairement d'économies d'énergie en valeur absolue ; le contraire peut même survenir (cf. Encadré ci-dessous).

L'**effet rebond** a été théorisé pour la première fois par William Stanley Jevons dans un ouvrage publié en 1865<sup>12</sup>. Il y décrit la hausse de la demande de charbon non seulement *malgré* mais aussi en partie *à cause* des gains d'efficacité de la machine à vapeur. L'effet rebond recouvre des effets de substitution et de revenus qui expliquent pourquoi les gains d'efficacité des machines (ou plus largement énergétiques) ne provoquent pas nécessairement des économies d'énergie. L'effet peut même être inverse, c'est-à-dire plus que compenser les économies attendues à utilité constante et aboutir à une hausse de la consommation en valeur absolue, comme pour le charbon et les machines à vapeur au XIXe siècle – on parle dans ce cas de « paradoxe de Jevons ».

Cet effet rebond sur le réseau se traduit par une augmentation des volumes d'activité numériques au sein des autres composantes de l'écosystème numérique, et notamment les data centers et les terminaux.

Le déploiement d'un réseau mobile de 5<sup>ème</sup> génération en France pose donc question sur le plan environnemental en raison des liens entre les réseaux, les usages numériques et les autres pans de l'écosystème numérique.

Ce phénomène est très important car de multiples études dans le monde et en France pour estimer l'impact environnemental du numérique relèvent en effet la part relativement minoritaire qu'occupent les réseaux de télécommunications dans les consommations d'énergie et l'empreinte carbone du secteur numérique. C'est donc bien l'empreinte de l'ensemble du numérique qui est susceptible d'évoluer du fait du déploiement de la 5G et c'est cette approche que nous avons décidé de suivre dans ce rapport, afin de permettre au Haut conseil pour le climat (HCC) de rendre « un avis portant sur l'évaluation prospective de l'impact carbone de la 5G », répondant ainsi à la demande qui lui a été faite par le Président du Sénat.

#### 4. Périmètre d'étude

La présente étude évalue l'empreinte carbone du déploiement de la 5G en France à horizon 2030, par différentiel entre l'empreinte carbone du secteur du numérique avec et sans ce déploiement.

Comme évoqué dans les sections précédentes, le secteur du numérique ou des TIC (Technologies de l'Information et de la Communication, « *ICT sector* » en anglais) est composé de trois grandes catégories de systèmes, appelés sous-ensembles : les réseaux, les datacenters et les terminaux<sup>13</sup>.

<sup>12</sup> W. Stanley Jevons, « *On the Variation of Prices and the Value of the Currency since 1782* », Journal of the Statistical Society of London, Jun, 1865, Vol. 28, No. 2 (Jun., 1865), pp. 294-320+1-4

<sup>13</sup> Les logiciels sont d'une autre nature et forment en quelque sorte une couche qui lie ces trois sous-ensembles matériels entre eux.

Les terminaux numériques et les serveurs sont des périphériques, connectés entre eux par des réseaux. Les terminaux numériques sont ainsi des points d'accès de communication entre l'homme et un ensemble de serveurs, abrités dans des datacenters. Schématiquement, les terminaux sont reliés à des datacenters, où un serveur se charge de traiter les commandes de l'utilisateur et de renvoyer aux terminaux les informations résultant des traitements. Notons que les terminaux peuvent aussi être reliés entre eux, communiquant par les réseaux, sans passer par les datacenters. C'est ce que l'on appelle la communication pair-à-pair (peer-to-peer), qui utilise par exemple la technologie du Bluetooth. La communication entre terminaux ou entre terminaux et serveurs peut donc emprunter différents supports, comme les réseaux mobiles ou filaires présentés dans la section précédente.

Le périmètre de l'étude peut donc se résumer en trois sous-ensembles, chacun divisé en composantes. Ces trois sous-ensembles sont consommateurs d'énergie (à la fois pour leur fabrication et pour leur utilisation) émettrice de gaz à effet de serre. Les trois sous-ensembles sont définis plus en détails ci-après.

## **Les réseaux**

L'étude porte sur sept composantes des réseaux en France :

- Quatre générations de réseaux mobiles (2G, 3G, 4G et 5G)
- Deux types de réseaux fixes : WiFi et filaire
- Une catégorie définie par défaut pour représenter les autres réseaux

Les « autres réseaux » sont variés, et de faible ampleur. Ils se distinguent soit par l'application, lorsque des bandes de fréquences radio sont par exemple réservées aux télécommunications de l'aviation civile, maritimes, militaires, spatiales etc., soit par un exploitant différent des quatre principaux opérateurs, comme Télévision de France, des opérateurs régionaux et d'Outre-Mer, des entreprises possédant un réseau privé, etc.

Des dépenses énergétiques non attribuables aux composantes susmentionnées doivent également être considérées. C'est notamment le cas des consommations d'énergies fossiles des opérateurs (*scope 1*) pour des activités diverses (ex : générateurs électriques d'appoint, chauffage des locaux). Les opérateurs mesurent et publient des données sur ces consommations.

## **Les datacenters**

Les datacenters sont des lieux où sont effectués des services de stockage et de traitement de données pour des utilisateurs multiples (entreprises ou consommateurs), utilisateurs auxquels les datacenters sont reliés par le réseau numérique. Un datacenter peut opérer à des échelles réduites, comme celle d'une entreprise avec ses propres serveurs, ou au contraire à l'échelle internationale (ex : recours au Cloud, utilisation des services des GAFAM). Les datacenters hébergent des serveurs – ordinateurs réalisant des traitements – ainsi que des baies - disques durs stockant les données.

Selon une étude prospective de Xerfi<sup>14</sup> de 2018, la France compterait environ 200 datacenters d'hébergement et de *cloud computing* en 2020, soit 20 de plus qu'en 2018.

<sup>14</sup> « Les hébergeurs et gestionnaires de data centers à l'horizon 2020 », XERFI, septembre 2018

Le développement du big data et de l'intelligence artificielle, le déploiement de l'internet des objets et l'explosion des besoins de connectivité expliquent l'ouverture de nouveaux datacenters qui permettent de démultiplier les capacités de stockage et de calcul. Ils répondent aux besoins des entreprises et des administrations qui souhaitent externaliser leur informatique et migrer vers le *cloud* afin de réduire les coûts, de gagner en flexibilité et d'améliorer la qualité des services.

Les hypothèses de catégories de datacenters sont présentées au chapitre 3 (cf. Hypothèses sur les datacenters).

## Les terminaux

Communiquer par visioconférence, utiliser les réseaux sociaux, faire une recherche en ligne, regarder une vidéo en streaming, jouer en réseau aux jeux vidéo, envoyer et stocker des courriels, utiliser un objet connecté sont autant d'actions qui nécessitent l'utilisation d'un terminal. Ces dix dernières années, les terminaux se sont puissamment diversifiés.

L'ordinateur, la télévision et le smartphone constituent le trio de tête mais de nombreux autres terminaux sont également utilisés tels que les box internet, les montres connectées, les écrans, les imprimantes, les consoles de jeu ou encore les casques de réalité virtuelle. Peu à peu, de nouveaux objets du quotidien, hors de la sphère professionnelle et privée des logements s'ouvrent au numérique. C'est par exemple le cas des véhicules, plus précisément d'une part croissante des systèmes qui composent les véhicules.

Les 16 terminaux considérés dans cette étude sont listés ci-dessous :

- Les *smartphones* : aussi appelés « téléphones intelligents », ils désignent des téléphones mobiles dotés de fonctionnalités évoluées qui s'apparentent à celles d'un ordinateur : navigation sur internet, lecture de vidéos, de musique, de courrier électronique, bureautique légère, etc. Ils sont munis d'un processeur puissant, qui embarque une série de capteurs qui lui permettent de faire fonctionner des applications de navigation assistée ;
- Les *ordinateurs portables* sont des ordinateurs personnels dont le poids et les dimensions limitées permettent un transport facile. Un ordinateur portable est muni des mêmes types de composants qu'un ordinateur fixe classique, mais il intègre un écran, des haut-parleurs et un clavier physique.
- Les *ordinateurs fixes*, parfois appelés ordinateur de bureau (desk computer), sont destinés à être utilisés sur des bureaux ou tout autre endroit fixe, du fait de leurs dimensions, de leur masse et de leur alimentation électrique. L'unité centrale est le plus souvent composée d'un boîtier qui comprend un bloc d'alimentation, une carte mère et un système d'entrées-sorties. Plusieurs périphériques peuvent y être connectés, dont certains sont listés ci-dessous : un écran, un clavier, une souris, des haut-parleurs, une imprimante, etc. ;
- Les *imprimantes* : ce sont des périphériques d'ordinateurs permettant d'imprimer sur papier des éléments textuels ou graphiques. Les imprimantes se distinguent notamment par leur vitesse d'impression, la résolution, c'est-à-dire la précision d'impression, la mémoire, les consommables, en particulier les cartouches d'encre qu'elles utilisent, l'interface avec l'ordinateur ;
- Les *écrans d'ordinateurs* : ce sont également des périphériques de sortie visuelle et sonore d'ordinateur. Ils sont parfois utilisés en complément des écrans intégrés des ordinateurs portables, comme second écran. Ils se distinguent notamment par leur taille et leur résolution ;

- Les *tablettes*, parfois appelées tablettes tactiles, tablettes électroniques ou tablettes numériques, sont des ordinateurs portables ultraplats qui se présentent sous la forme d'un écran tactile sans clavier. C'est une sorte d'intermédiaire entre l'ordinateur portable et le smartphone ;
- Les *téléviseurs* permettent la transmission d'images sur un écran par câble ou fibre (qui sont des supports physiques) ou par ondes radioélectriques (TNT et satellite) ;
- Les *Box* (internet et TV) : elles désignent les boîtiers de connexion mis à disposition par les fournisseurs d'accès à internet (FAI) afin de bénéficier d'internet par réseau fixe. Les offres des FAI permettent généralement de coupler l'accès à internet, la téléphonie fixe illimitée et l'accès à un bouquet de chaînes télévisées ;
- Les *consoles de jeu de salon* : ce sont des ordinateurs autonomes servant principalement à jouer à des jeux vidéo en ligne ou hors ligne, mais également à regarder des contenus en streaming vidéo. Les consoles de salon sont connectées à un écran de télévision, sur lequel se branchent les sorties audio et vidéo ;
- Les *consoles de jeu portables* : à la différence des consoles de salon, les consoles de jeu portables, de petite taille, possèdent leur propre écran et sont de fait autonomes et facilement transportables ;
- Les *casques de réalité virtuelle*, aussi appelés visiocasques, sont des équipements portés sur la tête, qui installent un écran devant chaque œil, accompagnés d'écouteurs. Ils permettent aux personnes qui les portent de plonger dans un monde numérique virtuel. Ils sont souvent associés aux jeux vidéo, mais peuvent également être utilisés dans des contextes professionnels, telle que la médecine ;
- Les *lunettes de réalité augmentées* sont des équipements aussi portés sur la tête, comme des lunettes de vue classiques. Ce terminal permet de modifier la vue des utilisateurs. En effet, il intègre des éléments virtuels en 3D (en temps réel) au sein d'un environnement réel. Cette technologie peut être utilisée en divertissement, par exemple avec le jeu vidéo « Pokémon Go », ou dans un cadre professionnel, tel que dans des usines pour faciliter l'interaction avec des machines.
- Les *enceintes connectées*, parfois appelées haut-parleurs intelligents ou « enceintes intelligentes », sont des haut-parleurs sans fil à commande vocale, qui intègrent un assistant virtuel doté d'une intelligence artificielle avec laquelle l'utilisateur peut interagir par la parole. L'assistant virtuel interagit ensuite avec les objets qui lui sont connectés (IoT ou IIoT) pour en modifier le fonctionnement.
- Les *montres et bracelets connectés* se portent au poignet. Ces équipements donnent des informations sur l'environnement de l'utilisateur, comme la date, l'heure ou les prévisions météorologiques, et sur sa personne, telles que le rythme cardiaque ou la vitesse. De plus, certains de ses objets peuvent être connectés au réseau mobile, via un smartphone ou directement, et ainsi servir à téléphoner ou à écouter de la musique.
- Les *écrans publicitaires* ou panneaux d'affichage digitaux présentent des capacités d'affichage et de ciblage enrichies par rapport à l'affichage publicitaire traditionnel. Ces panneaux peuvent être installés en intérieur (aéroports par exemple), ou à l'extérieur. L'exemple emblématique est celui de Times Square à New-York. Depuis, d'importants progrès ont été accomplis, en matière d'interaction avec le passant, certains de ces écrans pouvant modifier leur contenu en fonction de qui les regarde.
- Les *modules de connexion IoT & IIoT* : miniaturisés et en général invisibles, ils sont intégrés dans l'objet (une ampoule électrique ou une poêle, par exemple) ou l'équipement (un réfrigérateur ou un four, par exemple). Ces modules comportent plusieurs circuits intégrés leur permettant d'interagir avec l'objet ou l'équipement, de traiter des données et de communiquer via une interface filaire ou une interface radio avec une passerelle ou centrale de gestion, elle-même en général connectée à

Internet. Il s'agit donc des systèmes de capteur et de connexion qui transforment des objets et machines en « objets et machines connectés ». C'est la composante matérielle de l'internet des objets ou « Internet of Things » en anglais. Déjà présent dans notre quotidien, ces terminaux seront amenés à connaître une croissance importante grâce au développement des réseaux mobiles et fixes. En effet, les modules de connexion IoT et IIoT peuvent être utilisés de multiples façons, tel que dans l'industrie, l'aménagement et la gestion des territoires et dans les transports.

La diffusion du numérique dans les machines et objets connectés floute les limites du secteur. Un objet connecté se distingue d'un « pur » terminal numérique dans la mesure où la télécommunication n'est pas essentielle à la fonction première de l'objet. Cette définition pose nécessairement des difficultés. Est-ce que la télécommunication est essentielle au fonctionnement d'une imprimante ? L'étude considère que oui concernant les imprimantes à domicile et de bureau, mais exclut à l'inverse les imprimantes industrielles ; ces dernières sont considérées comme des machines connectées, dont les empreintes énergétique et carbone se limitent aux modules de connexion IoT & IIoT dont elles sont équipées. C'est d'ailleurs le cas d'un nombre de plus en plus considérable de machines industrielles (ex : instruments de métrologie, machines-outils à commande numérique...).

Le périmètre d'étude concernant les terminaux n'est par conséquent pas exhaustif. D'une part, des objets existants pouvant être qualifiés de « purs terminaux numériques » ont été laissés hors champ (le téléphone « classique » à l'inverse du smartphone et talkie-walkie par exemples) et d'autre part, il est vraisemblable que de nouveaux terminaux seront inventés dans la prochaine décennie.

La figure ci-après schématise les interactions entre les 3 sous-ensembles du numérique, et distingue le trafic fixe (en jaune) du trafic mobile (en bleu).

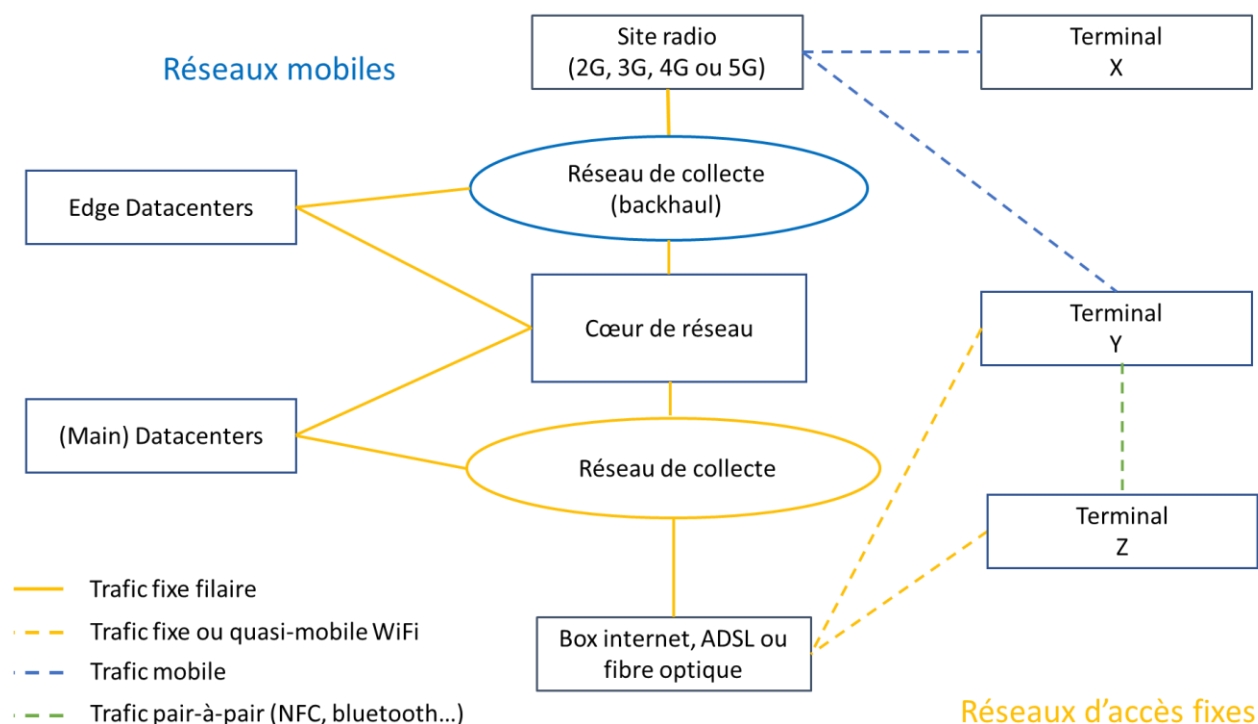


Figure 6. Schéma des relations entre terminaux, réseaux et datacenters

Le terminal X peut être par exemple un objet connecté par un module de connexion fonctionnant uniquement via le réseau 5G.

Le terminal Y peut être un smartphone, qui combine tous les modes de connexion.

Le terminal Z peut être un ordinateur portable, non-équipé de carte SIM, connecté en WiFi et communiquant avec un smartphone via Bluetooth.

### **Au-delà du périmètre d'étude**

Dans cette étude, seule l'empreinte carbone du numérique est estimée. L'empreinte environnementale du numérique est plus large. Elle ne se limite pas à la contribution au réchauffement climatique. Parmi les autres impacts environnementaux non-étudiés dans la présente étude, on peut citer les effets sur la qualité de l'air, les conséquences de l'emprise au sol des infrastructures et bâtiments du numérique, la consommation et la pollution de l'eau, l'épuisement des minéraux rares<sup>15</sup> et les diverses pollutions des sols au moment de leur extraction ou de la mise en décharge d'équipements non utilisés

L'étude laisse hors champ tous les impacts indirects du déploiement de la 5G en dehors du secteur numérique. Pour l'illustration, admettons que le déploiement de la 5G contribue significativement à l'avènement et l'adoption des véhicules parfaitement autonomes<sup>16</sup>. Un ensemble d'innovations en matière de technologie numérique permet donc à ce que l'on appellera par anglicisme « application conduite autonome » d'émerger (cf. Figure 7).

Tout d'abord, les technologies numériques mobilisées consomment de l'énergie sur l'ensemble de leur cycle de vie. Ensuite, la nouvelle « application » ou usage risque d'une part, d'accélérer le renouvellement des véhicules (effet d'obsolescence) et d'autre part, de stimuler la consommation à l'échelle microéconomique par exemple d'autres usages numériques en simultané (effet induit non-systémique). L'usage de la voiture autonome pourrait également se substituer pour partie à des déplacements effectués avec d'autres modes de transport (effet de substitution) – avec des effets contrastés sur le plan de émissions de gaz à effet de serre. Cet usage émergent permettrait enfin d'optimiser les trajets et modes de conduite pour économiser de l'énergie (effet d'optimisation).

L'ensemble des effets de l'usage de la voiture autonome sur les déplacements pourraient entraîner à leur suite des changements de comportement et de société structurants pour les dépenses d'énergie, par exemples au travers d'effets rebonds à l'échelle macroéconomique (effets induits par les économies en carburant et temps), au travers de risques (comme la mise en difficulté du système électrique) ou au contraire par l'émergence de modèles économiques plus vertueux sur le plan énergétique (comme les flottes de véhicules partagés).

<sup>15</sup> Quantifié par exemple à l'aide de l'indicateur des « tonnes équivalent antimoine » ; voir l'étude : « Impacts environnementaux du numérique en France », GreenIT (juin 2020)

<sup>16</sup> Niveau 5 d'autonomie selon l'Organisation internationale des constructeurs automobiles



Les impacts environnementaux des technologies numériques sont particulièrement complexes à évaluer au-delà du secteur du numérique. Surtout, ils sont hétérogènes selon les cas d'usage. De plus, l'attribution des impacts des nouveaux usages aux réseaux est d'autant plus délicate que les impacts dépendent autant des choix de développement de services numériques que de l'évolution de l'infrastructure – les impacts du déploiement de la 5G sont en quelque sorte plus indirects encore que ceux d'un nouveau terminal par exemple.

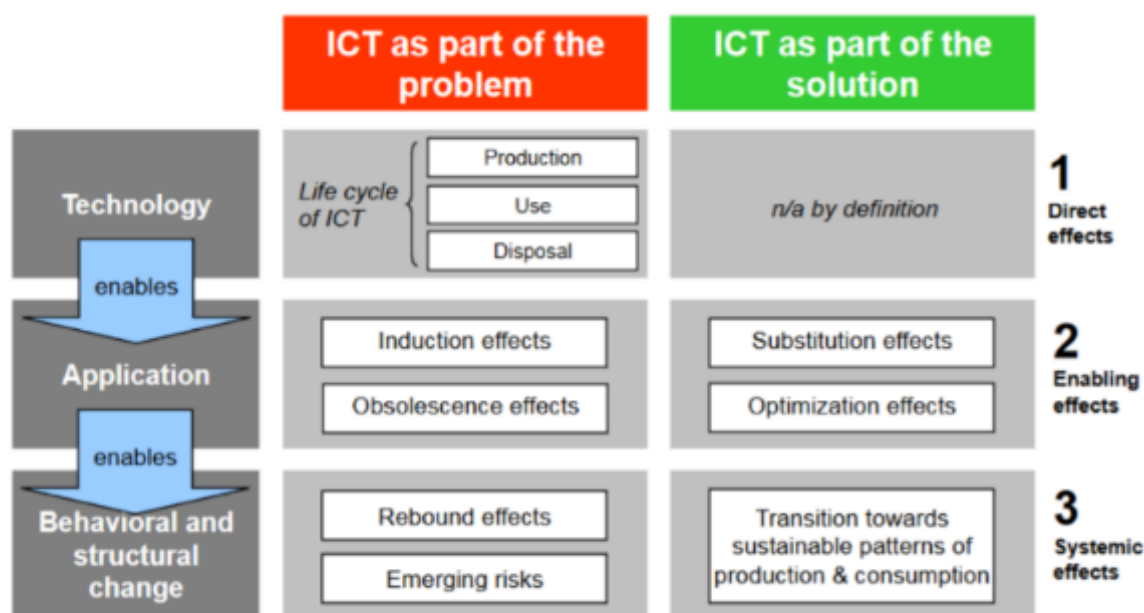


Figure 7. Classification des impacts du secteur numérique sur la consommation d'énergie et l'empreinte carbone  
(Source : Hilty & Aebischer, 2015)

Une méta-analyse d'Hilty et Bieser (2018) relève la diversité d'approches d'évaluation des impacts indirects environnementaux du numérique, et cela à l'échelle de simples technologies comme à une échelle plus systémique. A titre d'exemple, il n'est pas évident de déterminer quelles consommations l'utilisation d'une tablette permet d'éviter. Si l'on retient une substitution parfaite entre tablettes de type *e-book* et livres papier, alors une analyse en cycle de vie menée par Moberg et al. (2011) estime qu'il faut faire l'économie de 30 à 40 livres avant de compenser les émissions associées à la tablette.

Le sens de l'impact de la transition numérique sur les émissions de gaz à effet de serre dans le monde ne fait donc pas consensus.

Si certains points de vue s'élèvent en faveur de la 5G comme condition de passage d'une industrie traditionnelle à une industrie du futur, d'autres au contraire pointent les archaïsmes organisationnels de certaines industries, archaïsmes que l'arrivée de la 5G ne suffirait pas à résorber. En effet, si la présence en ligne des entreprises françaises est dans la moyenne des pays européens<sup>17</sup>, l'adoption de technologies numériques innovantes est plus faible. Selon la Banque Européenne d'Investissement, les entreprises industrielles françaises ont moins adopté les technologies de l'IoT, du Big Data et de l'intelligence artificielle qu'en

<sup>17</sup> Plus de 69% des entreprises en France possèdent un site web (France Num : « [LES CHIFFRES CLÉS SUR LA PRÉSENCE SUR INTERNET DES TPE PME EN 2019](#) ») contre 66% en Allemagne (Statistisches Bundesamt, décembre 2019), et 53% des entreprises françaises utilisaient les réseaux sociaux en 2019 contre 51% en moyenne en Europe et 68% au Royaume-Uni par exemple (Eurostat, 2019)

moyenne en Europe et aux Etats-Unis<sup>18</sup>. Surtout, l'écart entre petites et grandes entreprises industrielles françaises est plus marqué que dans le reste de l'Europe ou qu'aux Etats-Unis. Les grandes entreprises françaises sont d'ailleurs plutôt en avance sur les technologies de la fabrication additive (impression 3D) et de la robotique. Peut-être l'organisation des secteurs industriels français, souvent centrée sur quelques multinationales qui s'appuient sur des milliers de PME de petite taille, est-elle un facteur plus structurant que la technologie des réseaux de télécommunications en matière d'avancement de la transition numérique. Par ailleurs, il semble que la 4G et d'autres réseaux spécialisés permettent d'ores et déjà de déployer la plupart des solutions basées sur des objets connectés, y compris industriels.

Bien que les impacts sur d'autres secteurs ne soient pas étudiés, le périmètre d'étude inclut l'estimation des impacts du déploiement de la 5G plus ou moins directs sur le système numérique (cf. **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) Schématiquement, l'impact le plus direct concerne les émissions pour la fabrication et l'installation des équipements et infrastructures du réseau 5G. Viennent ensuite les consommations d'énergie du réseau 5G, puis des effets rebond sur le trafic avec des substitutions entre réseaux et des conséquences sur les datacenters. Enfin, le déploiement devrait affecter les terminaux par la levée de verrous technologiques qui favoriseraient l'émergence et l'adoption de certains terminaux, ainsi que par un simple effet de standard, incitant au renouvellement d'équipements.

### Impact du déploiement (variables endogènes)

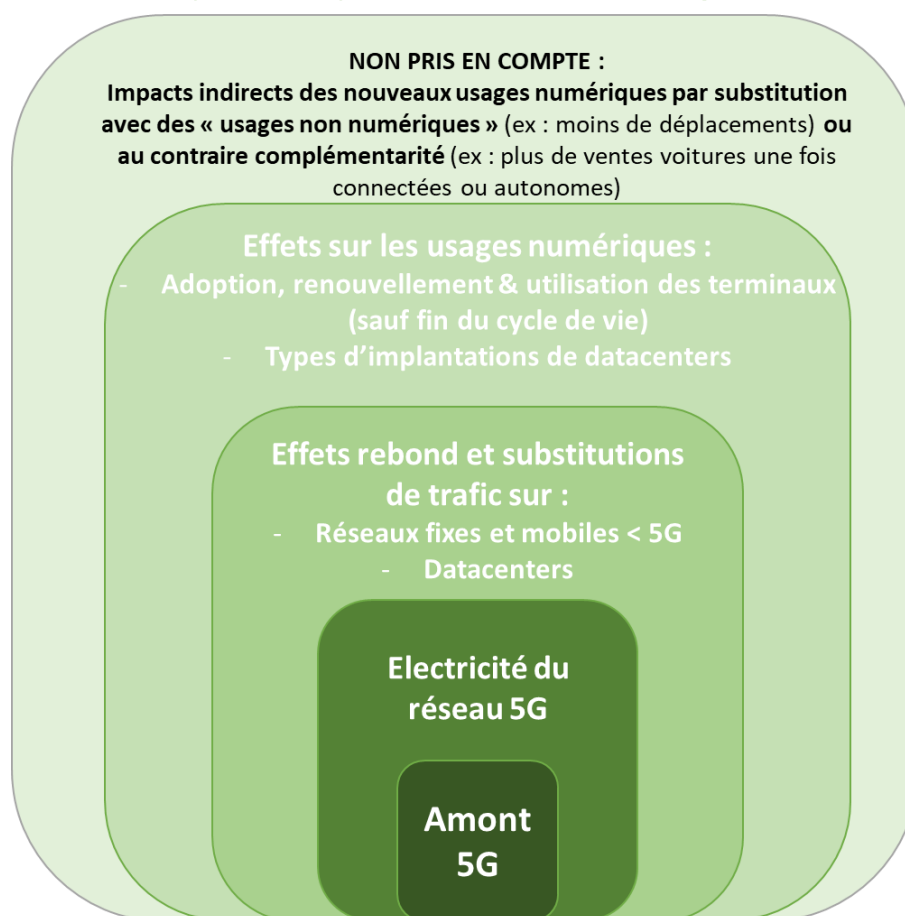


Figure 8. Représentation du périmètre d'étude en cercles

<sup>18</sup> EIB Investment Survey (EIBIS) 2019 : « [Who is prepared for the new digital age?](#) »

D'autres composantes *a priori* non-affectées par le déploiement de la 5G sont laissées hors champ par manque de données ou de temps d'étude. C'est le cas par exemple des émissions *scope 1* des « *pure players* » du secteur numérique en dehors des opérateurs, ou encore les émissions liées au recours aux réseaux à l'étranger pour fournir des services numériques en France (net du recours aux réseaux français pour fournir des services numériques à l'étranger).

Au global, ce sont les consommations des phases amont et utilisation des 3 sous-ensembles qui sont estimées dans cette étude. La fin de vie est laissée hors champs pour l'ensemble des composantes des trois sous-ensembles du numérique. Il y a à la fois un manque de données sur cette phase du cycle de vie et la présomption que les ordres de grandeur d'émissions de GES associées à la fin de vie sont négligeables au regard des émissions des autres phases ; les questions de l'épuisement des matières premières et de pollution de l'eau se posent avec bien plus de force. La Figure 9 ci-après résume les différentes phases du cycle de vie ; les phases encadrées sont celles étudiées dans le présent rapport.

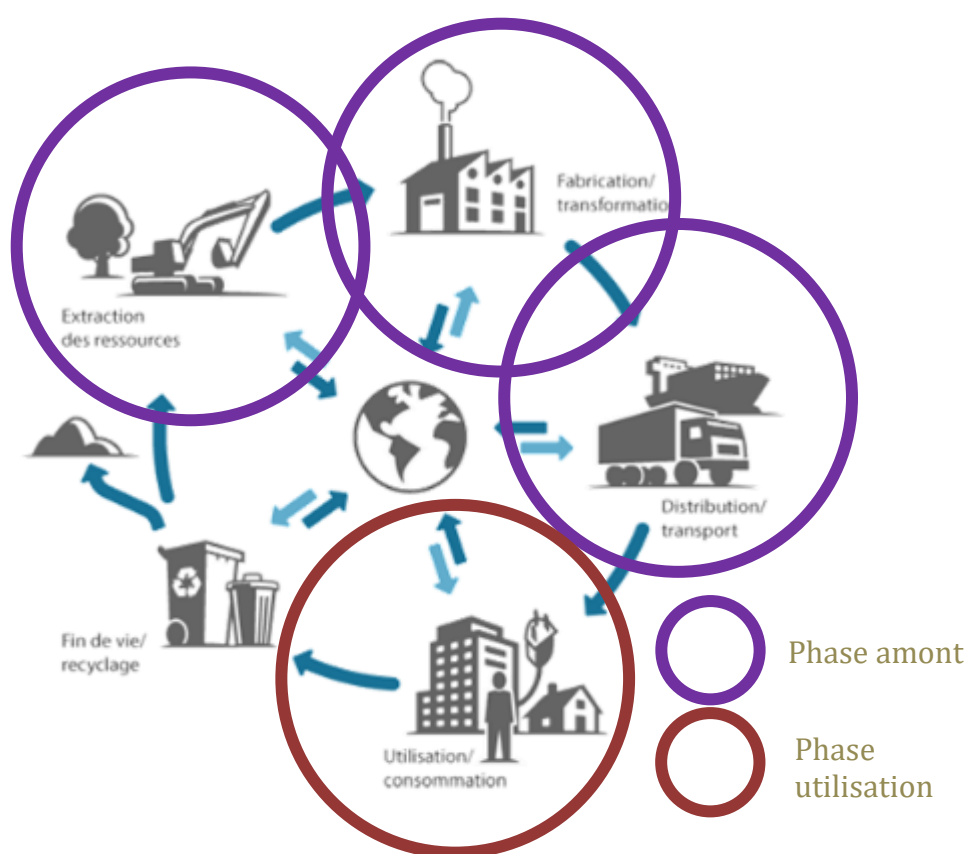


Figure 9. Schéma en cycle de vie

## 5. Éléments méthodologiques généraux

### Méthode d'estimation générale : une évaluation en différentiel

Estimer l'impact du déploiement de la 5<sup>e</sup> génération mobile à horizon 2030 nécessite d'effectuer une évaluation en différentiel. Pour cela, il faut comparer une situation où la 5G est déployée (scénario de « déploiement ») à une situation où la 5G n'est pas déployée (scénario de « non-déploiement »).

Ne pas évaluer en différentiel conduirait à attribuer toute l’empreinte carbone du numérique au déploiement de la 5G, alors même que sans 5G, l’empreinte carbone du numérique est positive. Il faut donc estimer le delta entre ces deux scénarios, ainsi que l’évolution de ce delta entre 2020 et 2030.

Dans chaque scénario, des variantes sont établies pour illustrer les différents déploiements et non-déploiement qui peuvent être envisagés. Ces variantes permettent aussi d’encadrer l’incertitude inhérente aux projections. En effet, certaines hypothèses, telles que celles portant sur l’évolution du trafic de données et les ventes de terminaux, sont sensibles pour l’estimation. C’est pourquoi il est nécessaire d’encadrer l’incertitude à l’aide d’hypothèses spécifiques aux variantes. De plus, ces variantes permettent de faire des recommandations. Par exemple, la variante basse du scénario de déploiement (« La 5G sélective) ne répond volontairement pas aux obligations du cahier des charges d’attribution des bandes de fréquences 3,5 GHz par l’ARCEP. De cette manière, il est possible de discuter d’une solution pouvant limiter l’impact du déploiement de la 5G, tout en augmentant la qualité de service des réseaux par rapport au non-déploiement. Les variantes de chaque scénario sont définies dans le *Chapitre 2 : Définition des scénarios et de leurs variantes* ».

### Les indicateurs calculés

Plusieurs indicateurs sont calculés : la consommation d’énergie primaire et les émissions de gaz à effet de serre. En outre, bien que ne constituant pas un indicateur environnemental au sens strict du terme, la consommation d’électricité en France en phase d’utilisation des sous-ensembles est estimée.

#### *La consommation d’énergie primaire et d’énergie finale*

L’**énergie primaire** représente le « potentiel de transformation » (mouvement, chaleur, courant électrique, etc.) présent dans la nature sous forme de vent, biomasse, énergie fossile, uranium, etc. C’est une ressource L’**énergie finale** représente la quantité d’énergie consommée après les pertes de conversion et d’acheminement, donc telle que mentionnée sur les factures des consommateurs finals : entreprises, établissements publics et particuliers. Enfin, l’**énergie utile** représente la part d’énergie finale convertie dans la forme attendue, celle qui correspond au besoin de l’application (ex : rotation d’un moteur et non chaleur diffuse, lumière et non chaleur d’une ampoule). Cette dernière mesure de l’énergie dépend non seulement de caractéristiques de l’équipement consommateur d’énergie finale, mais aussi du contexte d’utilisation et des attentes des bénéficiaires de l’équipement.

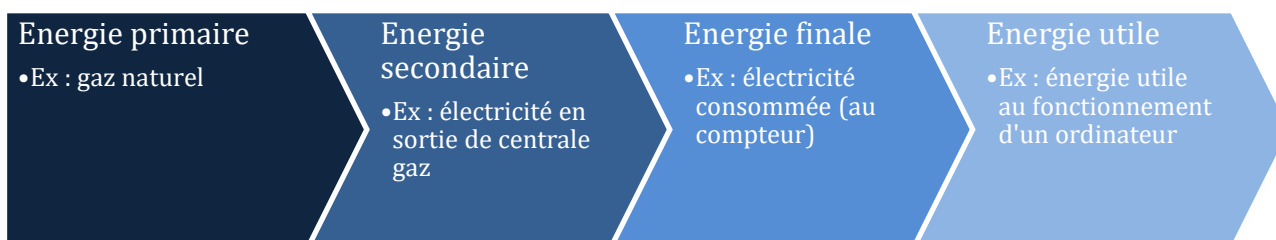


Figure 10. Stades de transformation de l’énergie depuis une ressource jusqu’au besoin

L’énergie primaire constitue une ressource dont le stock (comme par exemple les rayonnements du Soleil sur la Terre) est fini, tandis que l’électricité est un vecteur énergétique qui s’inscrit dans le schéma vectoriel suivant des énergies en France.

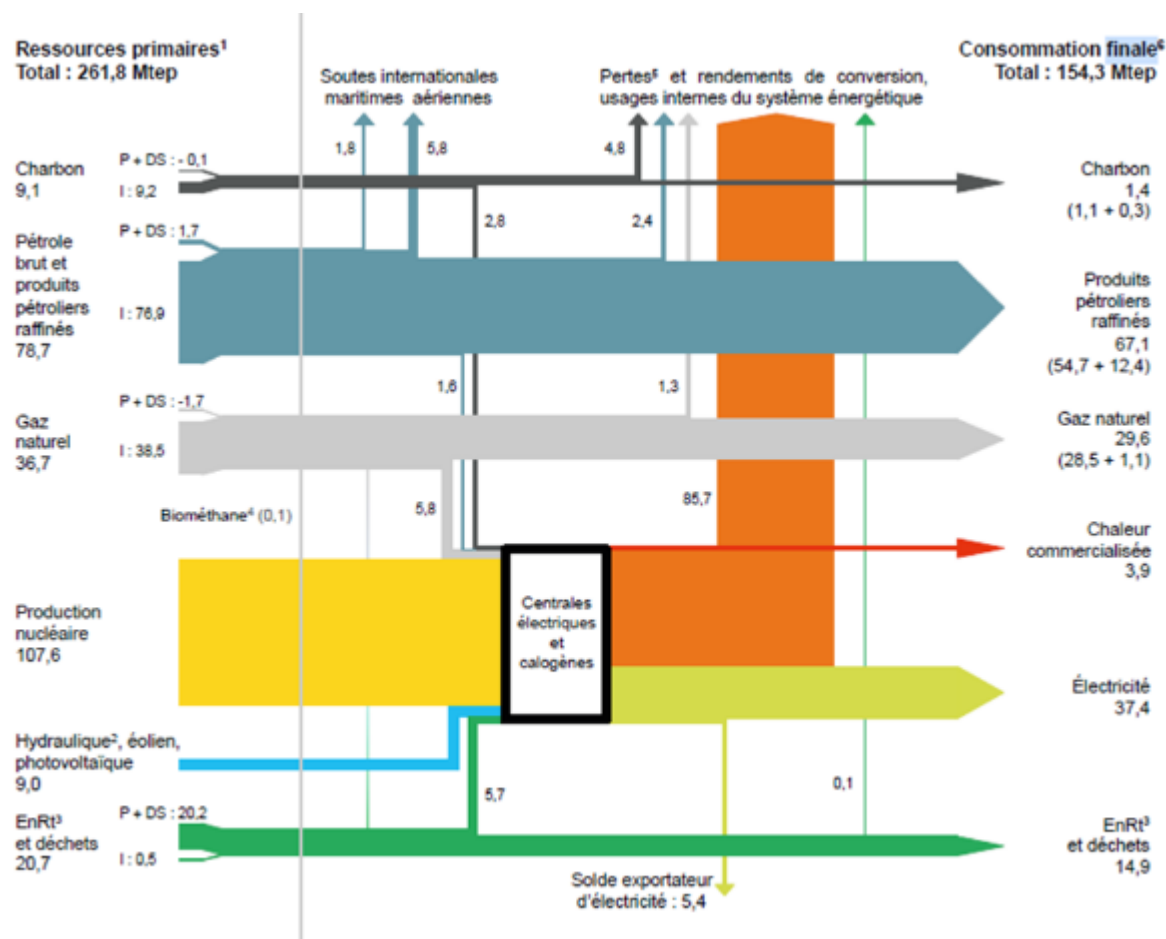


Figure 11. Ressources d'énergie primaire et consommation d'énergie finale en France en 2018 représentées sous forme de diagramme Sankey (Source : CGDD, 2019)

### Les tonnes équivalent de CO<sub>2</sub>

Une fois les consommations énergétiques estimées, elles peuvent être traduites en tonnes équivalent de CO<sub>2</sub>. L'unité « tonnes équivalent de CO<sub>2</sub> » (tCO<sub>2</sub>eq) créée par le GIEC, permet d'agréger le potentiel en matière de réchauffement climatique de l'ensemble des gaz à effet de serre. Pour ce faire, un « potentiel de réchauffement global » (PRG) est attribué à chaque gaz à effet de serre ; le PRG est estimé relativement au CO<sub>2</sub>, qui sert donc d'étalon pour cette unité.

Par exemple, sur une période de 20 ans, le PRG du méthane est supposé être de 84 ; en d'autres termes, une tonne de méthane « vaut » 84 tonnes de CO<sub>2</sub> en termes d'impact sur le réchauffement climatique.

Les tonnes équivalent de CO<sub>2</sub> ont été estimées par :

- Sous-ensemble, c'est-à-dire pour chaque composante des réseaux, des terminaux et des datacenters ;
- Phase du cycle de vie, auxquelles des consommations d'énergies différentes sont attachées ;
- Lieu d'émission, c'est-à-dire que les émissions tCO<sub>2</sub>eq ont été estimées de façon à différencier celles émises en France de celles émises à l'étranger.

## Les paramètres structurants et communs aux scénarios

Dans les deux scénarios (scénario de déploiement et scénario de non-déploiement de la 5G), certains paramètres n'ont pas été différenciés, puisque considérés comme exogènes. C'est le cas des données démographiques, du ratio énergie primaire / électricité et de l'intensité carbone de l'électricité. Les rythmes d'évolution des valeurs présentées ci-dessous sont décrits dans le Chapitre 3 : Paramètres et hypothèses du modèle.

### *Les données démographiques*

Les données de population et de nombre de ménages proviennent de l'INSEE (2016, qui est l'année du dernier recensement national).

La pyramide des âges au 1er janvier 2018 (INSEE, fin 2017) permet d'estimer la population française âgée de 12 ans ou 16 ans et plus qui, selon le terminal considéré, offre une assiette plus fine pour appliquer des taux d'équipement.

Les données démographiques sont identiques, en 2019 et sur l'ensemble de la période quels que soient le scénario et la variante.

### *Le ratio énergie primaire / électricité*

Le ratio énergie primaire/électricité est le coefficient de conversion de l'énergie primaire vers l'électricité. Ce facteur, estimé à 2,525 en France, est semblable aux facteurs Européens (2,5) et Américain (2,6), qui sont des territoires dans lesquels de l'électricité est consommée du fait des usages français du numérique, notamment au travers des datacenters.

La mission retient donc un facteur unique de 2,525 en 2020, et ce, que l'électricité soit consommée sur le territoire national ou non, pour les scénarios de déploiement et de non-déploiement.

Pour mémoire, les équivalents d'unités énergétiques sont utilisés :

- 1 kWh = 3,6 MJ (mégajoules)
- 1 tep (tonne équivalent pétrole) = 11630 kWh

### *L'intensité carbone de l'électricité*

Pour la France, l'intensité carbone de l'électricité en 2018, telle qu'estimée par l'ADEME à l'aide d'une moyenne pondérée des quatre années précédentes, s'élève à 57,1 grammes d'équivalent CO<sub>2</sub> par kilowattheure (57,1 gCO<sub>2</sub>eq/kWh). La trajectoire de cette intensité carbone de l'électricité est discutée dans le chapitre 3.

Dans les deux scénarios, l'intensité carbone de l'électricité à l'étranger utilisée est estimée à partir de celle observée aux États-Unis en 2019 (493 gCO<sub>2</sub>eq/kWh), où est situé un nombre important de datacenters qui servent la France aujourd'hui. En 2020, l'hypothèse d'évolution de l'intensité carbone des États-Unis décrite dans le Chapitre 3 : Paramètres et hypothèses du modèle aboutit à 476 gCO<sub>2</sub>eq/kWh.

Pour la phase amont, les multiples formes que prend l'énergie (extraction des matériaux, essences pour les engins, énergie nécessaire à faire fonctionner l'usine, transport jusqu'au lieu de distribution, distribution) sont converties en énergie primaire, pour laquelle un ratio moyen d'intensité carbone a été estimé à environ 59 grammes d'équivalent CO<sub>2</sub> par mégajoule (59 gCO<sub>2</sub>/MJ) en 2020, ou 213,8 grammes d'équivalent CO<sub>2</sub> par kilowattheure (213,8 gCO<sub>2</sub>eq/kWh), comme indiqué par Andrae (2020). De nouveau, la valeur 2020 et le

rythme d'évolution sur la période sont communs aux scénarios de déploiement et de non-déploiement.

## **Chapitre 2 : Définition des scénarios et de leurs variantes**



Comme mentionné dans le chapitre précédent, l'évaluation s'effectue en différentiel entre un scénario avec déploiement de la 5G et un scénario sans déploiement de la 5G. Le présent chapitre vise à décrire ces deux scénarios, ainsi que leurs variantes. La demande d'évaluation portant jusqu'à 2030, l'ensemble des variantes décrit des situations possibles à horizon 2030.

## 1. Le scénario de déploiement de la 5G

Un réseau mobile selon la 5<sup>ème</sup> génération de standards est en cours de déploiement sur le territoire national. Les investissements nécessaires devraient être portés en majorité par les quatre principaux opérateurs (Orange, Bouygues, SFR et Free), auxquels ont été attribués les droits d'exploitation de 31 blocs de fréquence de 10 MHz dans la « bande cœur » de la 5G (autour de 3,5 GHz) pour près de 2,8 milliards € le 1<sup>er</sup> octobre 2020. Le marché de la téléphonie mobile 5G en France semble ainsi devoir se structurer dans la continuité des générations de standards mobiles précédentes, où la régulation joue un rôle important, en particulier par la stimulation de la concurrence entre les opérateurs et par la poursuite d'un objectif de « service universel » afin de garantir à tous les Français un accès minimum au numérique.

Un article de *Matinmikko et al. (2017)* permet d'établir une typologie de modèles d'organisation des écosystèmes numériques. Il dresse quatre modèles à l'aide d'une matrice selon le partage des ressources du réseau et l'organisation industrielle des opérateurs (cf. Figure 12).

Le modèle organisationnel « *Eternal Today* » correspond à la continuité du modèle établi. Dans ce scénario, les modèles économiques dominants y sont ceux des acteurs en place comme les opérateurs, les fabricants d'équipements et de terminaux, et (du côté des services numériques) les fournisseurs de plateformes de commerce ou d'analyses de données sur les utilisateurs, plutôt que les créateurs de contenu et les fournisseurs de services contextualisés par exemples. De plus, le partage des ressources du réseau entre opérateurs y est limité. C'est aussi le cas d'un autre scénario qualifié de « *Wild West* », mais où le contrôle du réseau est désintégré avec l'avènement d'une multitude de petits opérateurs locaux ou spécialisés par marché.

Les deux derniers modèles sont caractérisés par un plus grand partage des ressources du réseau, et donc un réseau plus efficient et sobre :

« *Utopia* » verrait à la fois un partage des ressources mutualisables (cœur de réseau, sites « supports », etc.) et l'offre de services de connexion spécialisés par des petits acteurs émergents, sources d'innovations ; le jeu de la concurrence sur les marchés prompts aux monopoles que sont les réseaux fait de ce scénario une utopie. L'actualité sur la fibre avec le conflit entre Bouygues Telecom et SFR FTTH<sup>19</sup> illustre ces difficultés.

« *MNO's Law and Order* » implique un régulateur puissant, qui impose le partage de ressources entre opérateurs (voire réduit le nombre d'opérateurs – l'oligopole pourrait devenir monopole) avec pour objectif de maximiser l'efficacité de l'exploitation du spectre de fréquences dévolues aux réseaux mobiles. Les professionnels du secteur consultés par les auteurs (représentants de grands opérateurs et équipementiers) désavouent ce scénario. Ils semblent craindre la domination de l'écosystème par un type d'acteurs au détriment de l'innovation : soit les opérateurs qui convergent ou se jouent du régulateur, soit les géants

<sup>19</sup> [Raphaël Balenieri pour Les Echos, 18 novembre 2020](#) : « L'Arcep, le régulateur des télécoms, a donné raison, mercredi, à l'opérateur de Martin Bouygues au sujet des prix de gros que SFR FTTH (la filiale qui héberge le réseau fibre de SFR) facture aux autres opérateurs nationaux ou régionaux souhaitant se greffer sur son réseau de fibre optique dans les campagnes. »

mondiaux de l'internet qui imposent leurs conditions au couple opérateurs-régulateur par pays.

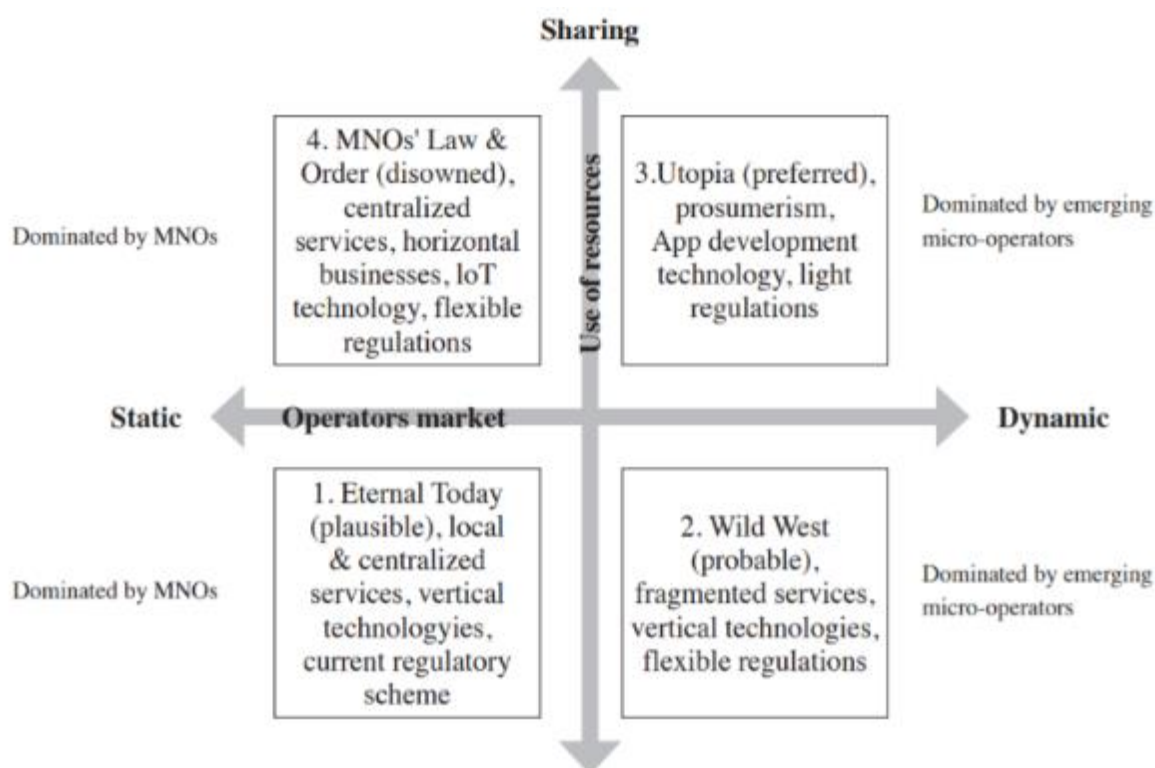


Figure 12. Matrice des scénarios pour les réseaux 5G  
(source : Matinmikko et al., 2017)

Dans la présente évaluation, nous dessinons un scénario de déploiement de la 5G qui ne remet pas en question l'écosystème des télécommunications en France. Le jeu d'acteur s'inscrit dans la continuité à la manière du scénario « *Eternal Today* » évoqué plus haut. Le réseau 5G y est déployé par plusieurs grands opérateurs concurrents, qui sont actifs à l'échelle nationale (au moins pour la France métropolitaine), partagent de manière limitée les ressources du réseau, et sont soumis à une régulation sur les bandes de fréquences et les ouvertures de sites.

A l'intérieur de ce scénario de déploiement de la 5G, des incertitudes subsistent sur les plans technologiques, de stratégie des acteurs, de services et usages numériques, etc. Ces incertitudes sont encadrées à l'aide de trois variantes au scénario de déploiement. Les variantes se différencient avant tout par la densité du maillage du réseau 5G à venir. Les incertitudes sur l'évolution des autres sous-ensembles du numérique (les terminaux et les datacenters) sont également encadrées dans la mesure où leurs évolutions apparaissent corrélées aux caractéristiques du réseau. Les variantes sont décrites ci-après et s'intitulent :

1. « La vraie 5G pour tous »
2. « La 5G du cahier des charges ARCEP »
3. « La 5G sélective »

Les incertitudes sur des paramètres extérieurs au numérique, comme des paramètres macroéconomiques, technologiques en matière d'énergie ou encore géopolitiques et sanitaires, affectent la fiabilité des résultats de ce travail prospectif, mais elles n'interviennent pas dans la scénarisation. Les incertitudes autour de ces paramètres macroéconomiques sont discutées dans le chapitre 3.

Les sous-sections qui suivent apportent une description qualitative des variantes. Les valeurs des paramètres différenciants entre variantes sont discutées dans le chapitre 3.

### 1.1. La variante « 5G du cahier des charges » (variante 2)

La variante centrale du déploiement a pour point de départ le respect des obligations posées aujourd'hui aux opérateurs dans le cahier des charges de l'ARCEP<sup>20</sup> sur la « bande cœur » de la 5G. Par exemple, les opérateurs doivent avoir mis en service au moins 10 500 sites 5G d'ici 2025, dont 25% en zone peu dense (cf. Figure 13).

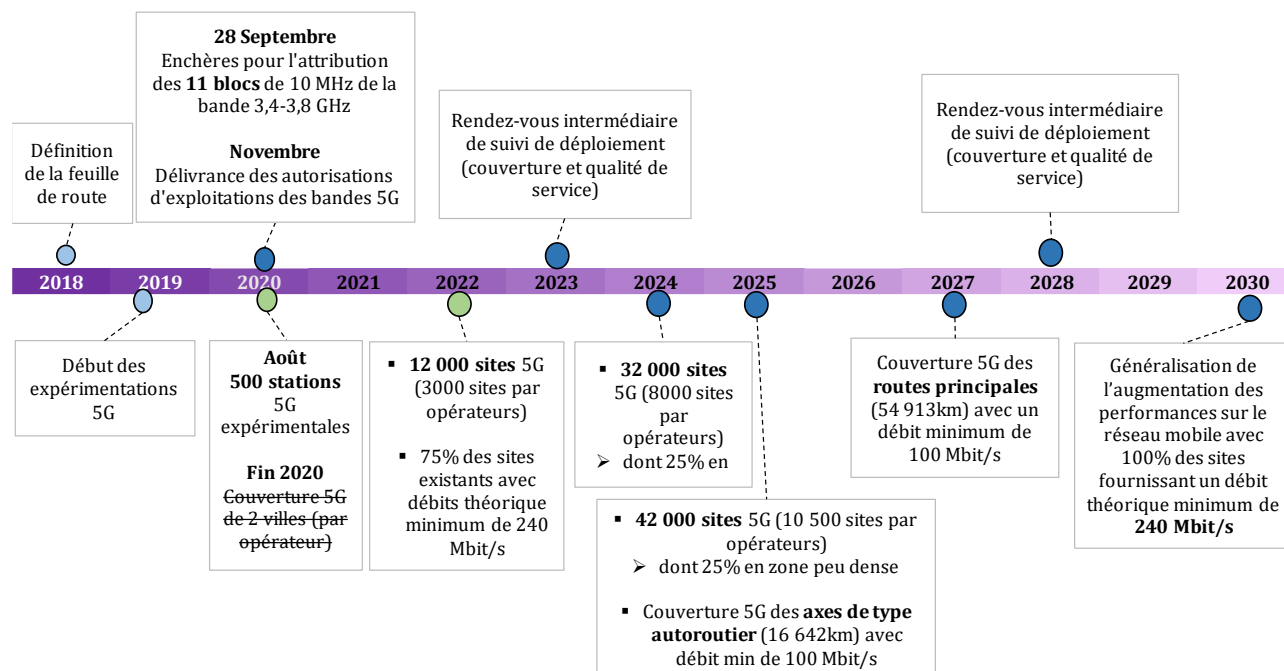


Figure 13. Frise des principales obligations du cahier des charges de l'Arcep aux opérateurs pour la 5G

Des hypothèses et extrapolations tendanciennes complètent la modélisation de cette variante. Ces hypothèses sont nécessaires étant donné le périmètre restreint des obligations définies actuellement par le régulateur ; elles sont par exemple muettes sur la bande 26 GHz qui devrait être déployée ultérieurement et sur le nombre de sites-opérateurs minimum dans la bande 3,5 GHz après 2025.

Le principe de construction de cette variante centrale est de viser la plus grande plausibilité dans l'état des connaissances et le temps de l'étude. Les deux autres variantes de ce scénario encadrent certaines incertitudes qui la concernent et aboutissent donc sur un déploiement soit plus massif (variante 1), soit plus restreint du réseau 5G (variante 3).

### 1.2. La variante « vraie 5G pour tous » (variante 1)

Dans la variante haute du scénario de déploiement, un maillage de sites 5G plus dense et plus étendu sur le territoire est modélisé, permettant une croissance annuelle du trafic de

<sup>20</sup> [Décision n° 2019-1386 de l'ARCEP \(21 novembre 2019\)](#)







données mobiles légèrement plus rapide que la tendance historique. Une hypothèse distinctive de cette variante est le déploiement de la 5G sur la bande 3,5 GHz sur l'ensemble du territoire à horizon 2030. Il nous est apparu au fil des lectures et auditions qu'il s'agit de la seule solution pour obtenir la « vraie 5G » sur tout le territoire français, c'est-à-dire une qualité de service en termes de débit, latence, densité et fiabilité bien supérieure à la 4G. Parmi les autres hypothèses émises pour cette variante (cf. Hypothèses sur les réseaux

### 1.3. La variante « 5G sélective » (variante 3)

La variante basse du déploiement correspond à une trajectoire du numérique en France dans laquelle la 5G sert avant tout à « désengorger » les réseaux mobiles dans les poches de haute-densité. Elle implique l'abandon de certaines obligations du cahier des charges de l'ARCEP en matière de « service universel », c'est-à-dire notamment les obligations de couverture en 5G des zones peu denses.

Certains sites mobiles 4G en zone très dense devraient atteindre saturation dès 2022 ou 2023. Nous entendons par saturation d'un site mobile 4G une situation dans laquelle un opérateur exploite l'ensemble des bandes de fréquences dévolues à la 4G et pour lesquelles il a obtenu les droits (multi-bandes ou 4G+), et fait face soit à des pics de demande de débit par les utilisateurs soit à un nombre de connexions qui excèdent les capacités du site-opérateur au point de pas pouvoir assurer la qualité de service jusque-là délivrée. La définition de cette qualité de service minimum est délicate. Par analogie avec le réseau routier : à partir de quel degré de congestion est-ce qu'un axe est considéré saturé ? Et à quelle fréquence ? Les épisodes de congestion peuvent en effet survenir de plus en plus fréquemment sans pour autant arrêter la croissance du trafic moyen sur l'année – du moins pour un temps.

Le tableau ci-dessous (cf. Tableau 2) résume les différentes bandes de fréquence déployées dans les trois variantes du scénario de déploiement de la 5G, en fonction de la densité des zones de déploiement. La section Maillage du prochain chapitre précise les caractéristiques de ces zones et les hypothèses de déploiement.

Bandes de fréquence	La 5G sélective	La 5G du cahier des charges	La vraie 5G pour tous
700 MHz			
3,5 GHz	 Une partie des zones denses		
26 GHz			





-  Zones très denses
-  Zones denses
-  Zones peu denses
-  Toutes les zones

Tableau 2. Résumé du déploiement des bandes de fréquences 5G par zone

Notons que la présente étude a pris le parti de ne pas étudier la possibilité pour les entreprises de déployer des réseaux 5G privés. Cette pratique pourrait pourtant voir le jour dans certains secteurs, notamment le secteur industriel et de la recherche. Ce sera le cas en Allemagne puisque 74 licences sur la bande 3,7 à 3,8 GHz y ont été octroyées en septembre 2020 pour des réseaux privés<sup>21</sup>. Au moins pour la bande de fréquences autour de 3,5 GHz, le

<sup>21</sup> Lire par exemple l'IEEE sur le sujet : [Alan Weissberger, 25 septembre 2020](#)

régulateur français ne semble pas devoir autoriser de telles attributions. Enfin, notons que si ces pratiques devaient survenir (dans la bande 26 GHz par exemple) elles pourraient s'observer tant dans le scénario de déploiement que dans le scénario de non-déploiement (sans nécessité de s'appuyer sur un réseau 5G public national).

## 2. Scénario de non-déploiement

Le scénario de non-déploiement d'un réseau mobile 5G en France est nécessairement un scénario de sobriété, dans le sens où il ne vise pas la même qualité de service des réseaux de télécommunications que le scénario de déploiement. En revanche, il ne s'agit pas d'un scénario de repli puisqu'il continuerait de permettre la croissance du trafic de données.

La croissance du trafic mobile n'irait cependant pas au même rythme qu'à présent jusqu'en 2030 sans la 5G. Des contraintes techniques s'y opposent, comme cela a été introduit dans le chapitre 1, partie 3, et dans la définition de la variante 3 ci-dessus. Il y aurait, d'une part, saturation des bandes de fréquences des générations de standards mobiles actuels, à commencer par les zones les plus denses, et d'autre part, une contrainte économique de rentabilité des opérateurs qui limiterait la multiplication des sites-opérateurs 4G dans les zones peu denses, ou augmenterait les prix sans amélioration notable de la qualité de service. Par conséquent, dans le scénario de non-déploiement, la croissance du trafic serait ralentie.

Le scénario de non-déploiement répond à la définition d'un scénario contrefactuel. La vraisemblance de survenue de ce scénario de non-déploiement ne semble plus faire débat (puisque les « coups sont partis »), toutefois la cohérence interne de ce scénario importe grandement.

La distinction entre scénarios de déploiement et de non-déploiement débute en 2021. Le modèle a un pas d'un an, soit une unité fonctionnelle d'une année de consommations de services numériques en France selon les termes de l'Analyse en Cycle de Vie.

La construction de deux variantes en scénario contrefactuel vise à encadrer les incertitudes sur des contraintes technico-économiques. Les hypothèses posées sur les paramètres d'adoption de terminaux émergents, de répercussion de l'absence de 5G sur le développement des datacenters, etc. sont légèrement différentes. La nature des variantes du scénario de non-déploiement est différente de celle des trois premières variantes dans la mesure où aucun parti pris sur une variable endogène ne distingue les variantes haute et basse. Elles procèdent toutes deux de l'hypothèse de l'absence complète de déploiement de la 5G (peu importe la raison ou les conditions). De plus, aucune variante ne prévoit de déploiement d'une technologie alternative, comme cela pourrait être fait avec un déploiement du Wifi public en zones denses ou le long des grands axes routiers par exemple. Les deux variantes servent ainsi à tracer un intervalle de confiance sur les projections du scénario de non-déploiement.

Une utilisation plus intensive du réseau 4G et un report d'une partie du différentiel de trafic mobile vers le fixe sont modélisés en scénario de non-déploiement.

Les variantes du scénario de non-déploiement sont sommairement intitulées « Non-déploiement HAUT » et « Non-déploiement BAS », ou bien désignées comme « variante 4 » et « variante 5 » respectivement.

# **Chapitre 3 : Paramètres et hypothèses du modèle**

Ce chapitre 3 décrit de façon aussi exhaustive que possible les valeurs des paramètres et hypothèses utilisés dans le modèle, et qui conduisent aux résultats (chapitre 4). Dans le cadre d'une évaluation prospective, de telles hypothèses sont incontournables. Le sous-jacent des choix des hypothèses y est défendu, mais est ouvert à la discussion.

Ce chapitre vise donc à faire œuvre de transparence.

## 1. Hypothèses sur les réseaux

Les dépenses énergétiques des réseaux de télécommunications en France peuvent être décomposées comme suit :

- Amont : énergie embarquée dans les achats d'équipements et amortie sur la durée de vie des infrastructures (cela correspond peu ou prou au *scope 3* des bilans carbone réalisés par les entreprises)
- Utilisation *scope 1* : les consommations directes de combustibles fossiles des opérateurs
- Utilisation *scope 2* : les émissions liées aux consommations d'électricité des opérateurs, en particulier pour faire fonctionner les réseaux (sauf génération propre pour leur consommation, en *scope 1*) :
  - Réseaux mobiles
  - Réseaux fixes
  - Autres réseaux (télévision, radio, satellite...)

Les émissions *scope 1* sont présumées exogènes d'une part et stables d'autre part, faute de tendance nette les cinq dernières années.

Toutes les autres dépenses énergétiques et émissions associées aux réseaux dépendent du couple maillage-traffic (l'offre et la demande en quelque sorte). Les hypothèses d'évolution du maillage des réseaux (mobiles), du trafic de données correspondant (mobile et fixe), des consommations par site (mobile) et de la phase amont sont détaillées ci-après.

### 1.1. Maillage

L'estimation de l'empreinte environnementale du réseau 5G requiert d'évaluer sa consommation électrique. Pour cela, il est nécessaire d'estimer le nombre de sites-opérateurs 5G déployés sur le territoire et la consommation par site-opérateur.

Lorsque l'on s'intéresse au maillage d'un réseau il est important de tenir compte du maillage en *macrocells* et du maillage en *smallcells*. Le premier fait référence aux antennes 5G présentes sur les pylônes (cf. Figure 3). Le second correspond à des antennes plus petites, qui nécessitent parfois une *macrocell* pour fonctionner. En effet, le rôle principal des *smallcells* est d'améliorer la qualité de service en servant de relais ou de complément de couverture aux *macrocells*. Par exemple, elles peuvent servir à contourner un obstacle qui réduit la qualité de service. La distinction est nécessaire car la consommation d'une *smallcell* est inférieure à celle d'une *macrocell*. Par exemple, la consommation moyenne d'une *smallcell* 5G dans la bande 3,5 GHz est estimée à 5037 kWh et celle d'une *macrocell* 5G dans la même bande à 20148 kWh (cf. partie « Consommation par site » pour davantage de détails).

#### Macrocells

Concernant le maillage en *macrocells*, le nombre de sites-opérateur pour couvrir une surface territoriale dépend de la bande déployée. En effet, la pénétration et la portée d'émission

varient selon la bande de fréquence. La pénétration correspond à la capacité d'une onde à traverser un obstacle, tel qu'un arbre ou un mur, pour être captée par un terminal. Tandis que la portée correspond à la distance maximum à laquelle un terminal peut se connecter à une antenne. Dans la présente étude, les bandes de fréquence modélisées correspondent à celles identifiées par l'Organisation Mondiale des Telecom comme pouvant servir à la 5G : 700 MHz, 3,5 GHz et 26 GHz. L'Arcep a commencé par « libérer<sup>22</sup> » les bandes, avant de les attribuer dans le cadre du déploiement de la 5G.

Fréquences	Pénétration à l'intérieur	Portée	Débit	Attribution aux opérateurs	Beamforming
 <b>700 MHz</b> Déjà attribuée aux opérateurs depuis 2015, elle est pleinement disponible depuis mi-2019	★★★★	★★★★	★	✓	✗
 <b>3,5 GHz</b> En cours de réorganisation, elle offre un bon ratio couverture/débit et est souvent identifiée comme la bande "cœur 5G"	★★	★★★	★★★	✗	✓
 <b>26 GHz</b> Jusqu'à présent utilisée pour les liaisons satellitaires ou d'infrastructures, elle permettra des débits très importants dans les cellules de petite taille	★	★	★★★★	✗	✓

Figure 14. Performances attendues des bandes de fréquences 5G

Source : Arcep, 2020<sup>23</sup>

Le cabinet Tactis<sup>24</sup> s'est récemment intéressé<sup>25</sup> à la pénétration et à la portée de la 5G. Les experts y estiment le nombre de sites 5G dans la bande 3,5 GHz qui permettent de couvrir une surface équivalente à celle d'un site 4G. Pour exprimer la plus faible portée des antennes, les experts différencient le nombre de sites nécessaires selon trois zones : urbaine, périurbaine et rurale (cf. Tableau 3). Par commodité, ces zones ont été renommées en zones « très denses », « denses » et « peu denses ». Cette terminologie a été validée lors d'entretiens.

Le travail de Tactis ne portant pas sur les antennes des bandes 700 MHz ni 26 GHz, des hypothèses ont été posées pour réaliser ces mêmes estimations. Ces hypothèses ont été passées en revue au cours d'une série d'entretiens avec les auteurs de l'étude Tactis et appuyées par une revue de la littérature.

Concernant la bande 700 MHz, l'hypothèse posée est celle d'1 site 5G pour 1 site 4G dans les trois zones. En d'autres termes, la portée et la pénétration d'un site 700 MHz sont supposées égales à celles d'un site 4G.

Pour la bande de fréquence 26 GHz, l'hypothèse théorique posée est de 10 sites 5G pour 1 site 4G en zone très dense, mais en pratique, cette bande ne sera pas utilisée pour faire de la

<sup>22</sup> Ces bandes étaient auparavant occupées par d'autres services que mobiles.

<sup>23</sup> « [Parlons 5G : toutes vos questions sur la 5G](#) », Arcep (2020)

Le *beamforming* correspond à la capacité d'une antenne à émettre uniquement lorsque c'est nécessaire et en direction du terminal qui demande ou envoie une information. Cette technique viserait avant tout à améliorer la qualité de service dans les zones avec une forte densité de terminaux. Or la 5G 700 MHz ne s'adresse pas à ces situations, d'où certainement la mention du *beamforming* pour les deux autres bandes de fréquence seulement.

<sup>24</sup> Le cabinet Tactis est spécialisé dans l'aménagement et la transformation numérique des territoires et les télécommunications.

<sup>25</sup> « [Doit-on s'attendre à une couverture 5G inférieure à celle de la 4G](#) », Tactis



couverture (voir tableau précédent), mais pour renforcer la capacité de zones où le trafic est très important. Pour rappel, cette dernière bande est déployée uniquement dans les variantes « La 5G pour tous » et « La 5G du cahier des charges » (cf. Le scénario de déploiement de la 5G).

Zones	Bande 700 MHz	Bande 3,5 GHz	Bande 26 GHz
Très dense	1	1	10
Dense	1	1,3	-
Peu dense	1	3	-

*Tableau 3. Nombre de sites 5G nécessaires pour couvrir une zone équivalente à un site 4G, par bande et par zone*

L'estimation du nombre de sites 5G à déployer sur le territoire dans les différentes variantes du scénario de déploiement requiert donc de travailler à partir des sites-opérateurs 4G en service.

En juillet 2020, leur nombre s'élève à 77 523<sup>26</sup>. Le nombre de sites-opérateurs en service continue de croître dans le cadre du New Deal Mobile et selon les stratégies des opérateurs. Afin de représenter la poursuite du déploiement de la 4G dans le modèle, le nombre de sites-opérateurs en service en 2025 tend vers le nombre de sites-opérateurs autorisés en novembre 2020, soit 91 810. A noter que ce chiffre est probablement sous-estimé car le nombre de sites autorisés continue de croître<sup>27</sup> et que les opérateurs poursuivent encore aujourd'hui l'installation de sites 3G, 6 ans après la commercialisation de la 4G.

Afin d'estimer le nombre de sites-opérateurs 5G à l'aide des ratios mentionnés précédemment, nous nous appuyons sur la ventilation actuelle des sites-opérateurs 4G entre les zones très denses, denses et peu denses. En effet, la densité de sites-opérateurs ne peut être égale entre les zones puisque la densité de population (et donc de trafic) est elle-même inégale. Autrement dit, la densité des zones très denses est supérieure à celle des zones peu denses. Pour quantifier cette ventilation, il a été nécessaire de cartographier les trois zones et de géolocaliser les sites-opérateurs 4G.

Pour ce faire, un premier travail de la présente étude a consisté à représenter le découpage territorial selon les zones très denses, denses et peu denses, en s'appuyant sur des travaux et des notions de l'Arcep. D'une part, le découpage de la première zone s'appuie sur les IRIS des zones très denses définies par l'Arcep dans le cadre du déploiement du réseau fibre optique. D'autre part, le découpage de ces zones correspond peu ou prou aux principales villes de France, qui elles-mêmes correspondent aux zones urbaines définies par le cabinet de conseil Tactis. La troisième zone correspond aux communes de la zone de déploiement prioritaire<sup>28</sup> des opérateurs, pour laquelle ils ont des obligations de couvertures spécifiques. Cette zone comprend environ 22 500 communes rurales. Le découpage de la deuxième zone correspond à l'espace ni couvert par une zone très dense ni par une zone peu dense (cf. Figure 15).

<sup>26</sup> « [Observatoire du déploiement des réseaux mobiles \(métropole\) – Juillet 2020](#) », ANFR (2020)

<sup>27</sup> En juillet 2020, le nombre de sites autorisés s'élève à 87316. En novembre 2020, le nombre s'élève à 91810.

<sup>28</sup> « [La couverture des zones peu denses](#) », Arcep, 2020

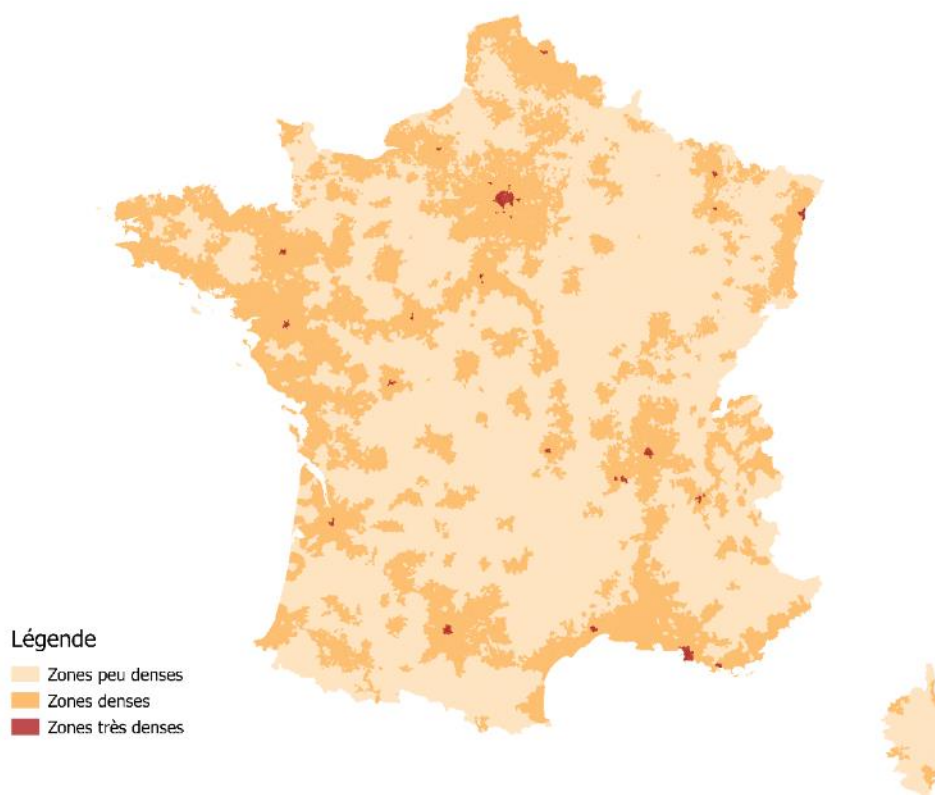


Figure 15. Découpage du territoire national en zones très denses, denses et peu denses

Pour les besoins de l'étude, il a ensuite été nécessaire de géolocaliser les sites-opérateurs 4G, ce qui a été rendu possible grâce à la base de données des antennes 4G de l'ANFR<sup>29</sup>. Dans ce document, toutes les antennes en service sont répertoriées et géolocalisées. Pour aboutir au nombre de sites-opérateurs en service, il a été nécessaire d'effectuer un traitement de base de données à l'aide de la variable indiquant l'opérateur exploitant l'antenne et celle du numéro du site (pylône). Avec ces deux variables, nous avons reconstitué ce qui correspond à un site-opérateur.

Enfin, la superposition des zones géographiques définies et les sites-opérateurs géolocalisés permet d'obtenir la ventilation des sites-opérateurs 4G par zone. Les principaux résultats de ce travail sont présentés dans le Tableau 4, ci-dessous.

	Territoire		Population		Sites		Sites-opérateurs		Antennes	
	km <sup>2</sup>	%	Millions pers.	%	unités	%	unités	%	unités	%
<b>Zones très denses</b>	2 196	0,4%	10	15%	7 074	14%	9 360	11,5%	33 655	16,2%
<b>Zones denses</b>	200 934	36,6%	43	67%	28 845	59%	46 721	57,4%	129 635	62,4%
<b>Zones peu denses</b>	345 870	63%	12	18%	13 005	27%	25 314	31,1%	44 458	21,4%
<b>Total</b>	<b>549 000</b>		<b>65</b>		<b>48 924</b>		<b>81 395</b>		<b>207 749</b>	

Tableau 4. Répartition de la population, des sites, des sites-opérateurs et des antennes 4G par zone

<sup>29</sup> « [L'observatoire en carte](#) », ANFR

La ventilation des sites-opérateurs 4G par zone géographique permet d'appliquer les ratios présentés dans le Tableau 5 pour aboutir au nombre de sites-opérateurs 5G nécessaire pour couvrir à 100% chaque zone.

	Bande 700 MHz		Bande 3,5 GHz		Bande 26 GHz	
	Ratio	Couverture 100%	Ratio	Couverture 100%	Ratio	Couverture 100%
<b>Zones très denses</b>	1	8 915	1	8 915	10	89 151
<b>Zone denses</b>	1	44 498	1,3	57 848	-	-
<b>Zones peu denses</b>	1	24 110	3	72 330	-	-
<b>Total</b>		<b>77 523</b>		<b>139 093</b>		<b>89 150</b>

Tableau 5. Nombre de sites-opérateurs nécessaires pour couvrir 100% des zones, par bande de fréquence 5G et par zone

### Smallcells

Concernant le maillage en *smallcells*, le nombre d'antennes dépend de la bande de fréquences considérée. En effet, plus la portée et la pénétration d'une antenne sont limitées, plus il sera nécessaire d'installer des *smallcells* pour assurer une qualité de service constante et équivalente sur la zone couverte. Par exemple, les antennes 5G dans la bande 26 GHz nécessitent plus de *smallcells* que les antennes 3,5 GHz.

#### Bande 700 MHz

La pénétration et la portée des antennes 5G dans la bande 700 MHz sont supposées équivalentes à celles des antennes 4G dans la bande 800 MHz. Sachant que ces antennes 5G sont déployées uniquement en zone peu dense de la variante « La 5G du cahier des charges », l'hypothèse de l'étude est qu'aucune *smallcell* n'est installée en accompagnement des antennes *macrocells* 700 MHz.

#### Bande 3,5 GHz

Contrairement à la bande précédente, la portée et la pénétration de la bande 3,5 GHz sont moindres. Les antennes de cette bande nécessitent d'être accompagnées de *smallcells* pour être optimisées. L'hypothèse définie et commune aux trois variantes est d'une montée en charge progressive du nombre de *smallcells* par *macrocell* en zone très dense. En 2030, le ratio final est de 3 *smallcells* pour 1 *macrocell* 3,5 GHz.

#### Bande 26 GHz

La portée et la pénétration de cette bande de fréquence étant faible, nous faisons l'hypothèse qu'une *macrocell* ne peut fonctionner sans un certain nombre de *smallcells*, pour contourner des obstacles par exemple. La littérature n'étant pas assez fournie, il n'a pas été possible d'estimer le nombre de *smallcells* qui accompagne une *macrocell*. Dans ce cas, nous parlons d'« environnements 26 GHz déployés » pour décrire le maillage et la combinaison *macrocell* et *smallcells*.

Le nombre de *smallcell* et *macrocell* 5G déployés en 2030 sont présentés ci-dessous (cf. Tableau 6) par variante.

Variante	Bande 700 MHz		Bande 3,5 GHz		Bande 26 GHz	
	<i>Smallcell</i>	<i>Macrocell</i>	<i>Smallcell</i>	<i>Macrocell</i>	<i>Smallcell</i>	<i>Macrocell</i>
La vraie 5 pour tous	0	0	26 745	181 953	0	89 151
La 5G du cahier des charges de l'Arcep	0	77 263	26 745	77 263	0	89 151
La 5G sélective	0	0	26 745	66 763	0	0

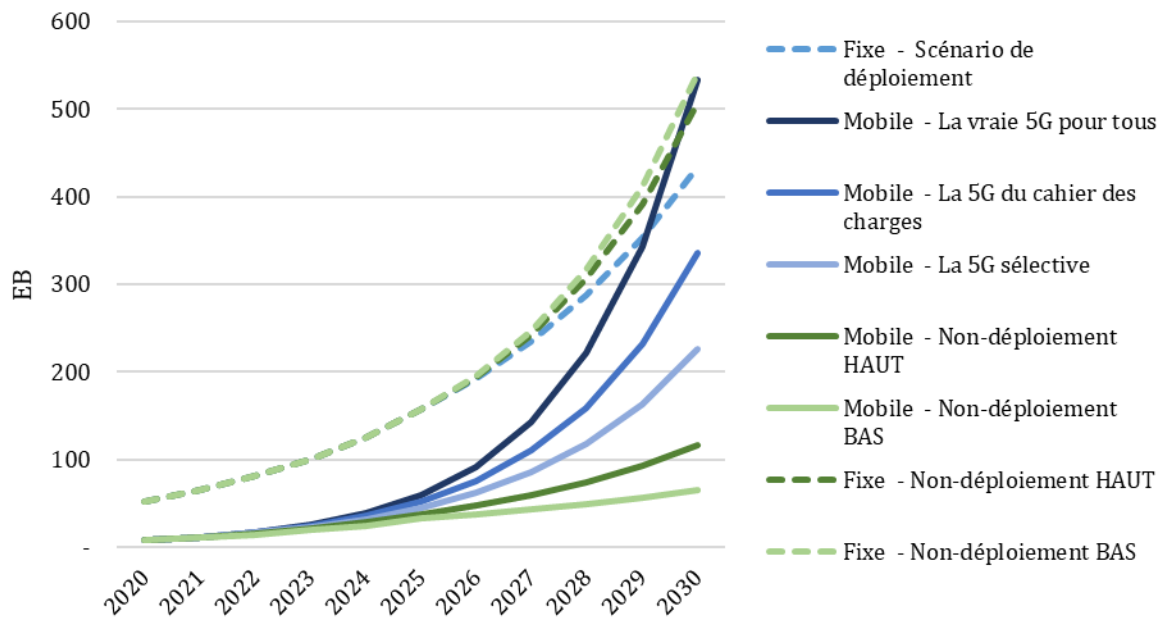
Tableau 6. Maillage 5G en 2030 par bande de fréquence et par variante de déploiement

## 1.2. Trafic de données

L'évolution du trafic de données doit être différenciée entre les variantes des différents scénarios et ventilée entre les réseaux fixes et mobiles. En effet, le déploiement de la 5G conditionne la poursuite de la croissance actuelle du volume de données échangées.

- Pour les réseaux fixes (Wifi et filaires), les hypothèses d'évolution du trafic de données sont peu différenciées entre les scénarios. La croissance annuelle du trafic filaire (ADSL et fibre optique) est de 15% sur l'ensemble de la période. Quant au trafic de données wifi, la croissance annuelle est de 30% jusqu'en 2025 puis elle passe à 25% jusqu'à la fin de la période. A cela s'ajoute en scénario de non-déploiement un léger report de trafic du mobile vers le fixe. Celui-ci est estimé comme la différence entre la hausse de trafic mobile tendancielle et une croissance du trafic mobile ralentie par des phénomènes de saturation (de la 4G tout particulièrement) après 2025. En « Non-déploiement HAUT », le trafic mobile augmenterait ainsi de 25% à partir de 2026, alors que cette croissance est de 35% par an à entre 2021 et 2025. En « Non-déploiement BAS », la croissance du trafic mobile est de 15% à partir de 2026, alors qu'elle est de 30% par an jusqu'en 2026. Ces différences sont reportées vers le trafic Wifi. La variante « Non-déploiement BAS » prévoit donc le trafic annuel de données fixes le plus élevé.
- Pour les réseaux mobiles, les hypothèses d'évolution du trafic de données sont spécifiques à chaque variante. Dans le scénario de déploiement, la croissance du trafic de données mobiles est différenciée selon les variantes. Cette différenciation permet d'illustrer les différents niveaux de service 5G proposés dans ces variantes et donc les usages qui peuvent être faits de la dernière génération mobile. Par exemple, la variante « La 5G du cahier des charges » connaît une croissance du trafic de données mobile équivalente à celle observée ces dernières années, soit une croissance annuelle de 45% sur l'ensemble de la période. Dans le scénario de non-déploiement, les hypothèses de croissance annuelle du trafic de données mobiles font référence à une plus ou moins grande sobriété de la consommation de données. Cette sobriété peut être le résultat du changement de comportement des utilisateurs, lié à une prise de conscience de l'impact environnemental du numérique. Il est aussi et plus assurément lié à la progressive saturation des réseaux mobiles et au renoncement aux gains de performance permis par la 5G (débit, densité, latence, fiabilité) ; deux évolutions qui limiteraient les améliorations de la qualité de service des réseaux mobiles.

Les projections de trafic de données mobiles et fixes sont présentées ci-dessous (cf. Graphique 1).



Graphique 1. Projections du trafic de données mobile et fixe par variante

### 1.3. Consommation par site

La consommation électrique d'un réseau (2G, 3G, 4G ou 5G) est obtenue par la multiplication du nombre de sites qui composent le réseau, par la consommation électrique moyenne par site-opérateur. Ce second paramètre comprend la consommation d'électricité du site-opérateur dans son ensemble, c'est-à-dire d'une ou plusieurs antennes et des autres équipements qui permettent le fonctionnement du site-opérateur. Par exemple, chaque site nécessite une armoire à équipements radio dont la consommation est assumée par un ou plusieurs opérateurs présents sur le site. De plus, la consommation électrique par site-opérateur dépend de l'utilisation, du trafic de données et des bandes de fréquences utilisées. Dans les différents scénarios et variantes, des hypothèses ont été faites pour tenir compte de ces éléments pour les sites-opérateurs 4G et 5G.

La puissance en charge moyenne d'un site-opérateur est exprimée en kilowatt (kW). Pour obtenir la consommation électrique annuelle moyenne, il faut multiplier la puissance électrique moyenne par 24h et 365 jours. Par exemple, la puissance en charge moyenne d'un site-opérateur 3G en 2020 est estimée à 1 kW, soit une consommation annuelle moyenne de 8760 kWh. Notons que la puissance moyenne utilisée ne correspond pas à la puissance nominale, qui sert à dimensionner le site selon les pics d'utilisation.

#### Les sites-opérateurs 2G

La puissance en charge moyenne d'un site-opérateur 2G est estimée à 0,5 kW et supposée stable sur l'ensemble de la période, soit une consommation annuelle moyenne de 4380 kWh. Cette valeur n'est pas différenciée entre les deux scénarios.

#### Les sites-opérateurs 3G

La puissance en charge moyenne d'un site-opérateur 3G est estimée à 1 kW et supposée stable sur l'ensemble de la période, soit une consommation annuelle moyenne de 8760 kWh. Cette valeur n'est pas différenciée entre les deux scénarios.

## Les sites-opérateurs 4G

La consommation électrique d'un site-opérateur 4G est distinguée selon deux types de sites-opérateurs : « 4G - *multi générations* » et « 4G - *seule* ». Cette différenciation permet de distinguer les sites-opérateurs où seule la 4<sup>e</sup> génération mobile est installée (« 4G - *seule* ») des sites-opérateurs qui accueillent plusieurs générations mobiles (« 4G - *multi générations* »). La présence de plusieurs générations mobiles sur un site-opérateur implique une consommation électrique plus élevée du site, mais moindre en moyenne pour le site-opérateur 4G qui s'appuie sur des équipements et l'infrastructure préexistants. Le nombre de site-opérateurs 4G « multi générations » est supposé à dire d'expert<sup>30</sup> égal au nombre de site-opérateurs 2G en service.

Afin de tenir compte de l'utilisation, du trafic de données et des gains d'efficacité énergétique, un taux de croissance annuel moyen de la consommation électrique par site-opérateur a été appliqué et différencié selon les scénarios et variantes. De plus, ce taux de croissance annuel moyen permet de tenir compte du fait qu'une proportion croissante du parc de sites opérateurs 4G doit utiliser plusieurs bandes de fréquence afin d'augmenter la bande passante disponible. Par exemple, dans la variante de déploiement « La 5G du cahier des charges », les taux de croissance annuelle moyens des sites-opérateurs 4G « multi générations » et « seul » sont de 5% sur l'ensemble de la période. A contrario, dans la variante basse du scénario de non-déploiement, pour tenir compte de la plus importante quantité de trafic transitant sur le réseau 4G, les taux de croissance annuelle moyens sont plus élevés. Pour les deux types de sites-opérateurs 4G, les taux de croissance annuelle moyens sont de 6,2% jusqu'en 2025 puis de 7,1% jusqu'en 2030.

### 4G – *multi générations*

La puissance en charge moyenne d'un site-opérateur 4G « multi générations » est estimée à dire d'expert<sup>31</sup> à 2,1 kW en 2018 et augmente de 5% par an jusqu'en 2020 pour atteindre une consommation annuelle moyenne de 20 282 kWh. Après 2020, la consommation électrique par site-opérateur varie en suivant les hypothèses de taux de croissance annuel moyen présentées dans le Tableau 7.

	Consommation 2020	TCAM 2020-2025	Consommation 2025	TCAM 2025-2030	Consommation 2030
La vraie 5G pour tous	20282	5%	25885	5%	33037
La 5G du cahier des charges	20282	5%	25885	5%	33037
La 5G sélective	20282	5%	25885	5%	33037
Le non-déploiement HAUT	20282	7,5%	29155	9,1%	45019
Le non-déploiement BAS	20282	6,2%	27440	7,1%	38588

Tableau 7. Consommation d'électricité par sites-opérateur 4G "multi générations" par variante

<sup>30</sup> Audition d'Hugues Ferreboeuf le 12 novembre 2020

<sup>31</sup> Audition d'Hugues Ferreboeuf le 12 novembre 2020

#### 4G – seule

La puissance en charge moyenne d'un site-opérateur 4G « seul » est estimée à dire d'expert<sup>32</sup> à 2,7 kW, soit une consommation annuelle moyenne de 23 652 kWh en 2020. Sur le reste de la période, la consommation électrique par site-opérateur varie selon les hypothèses de taux de croissance annuelle moyen -TCAM- (cf. Tableau 8).

	Consommation 2020	TCAM 2020-2025	Consommation 2025	TCAM 2025-2030	Consommation 2030
La vraie 5G pour tous	23652	5%	30187	5%	38527
La 5G du cahier des charges	23652	5%	30187	5%	38527
La 5G sélective	23652	5%	30187	5%	38527
Le non-déploiement HAUT	23652	7,5%	34000	9,1%	52500
Le non-déploiement BAS	23652	6,2%	32000	7,1%	45000

Tableau 8. Consommation d'électricité par site-opérateur 4G "seule" par variante

#### Les sites-opérateurs 5G

Tout comme la qualité de service, la pénétration et la portée, la consommation électrique moyenne d'un site-opérateur 5G dépend de la bande de fréquence déployée (700 MHz, 3,5 GHz ou 26 GHz). De plus, la consommation électrique associée aux différentes bandes de fréquence 5G n'est pas différenciée entre les variantes de déploiement.

Afin d'améliorer la qualité de service et de permettre le fonctionnement des sites opérateurs équipés d'une ou plusieurs antennes 3,5 GHz et 26 GHz, des hypothèses de déploiement de *smallcells* ont été faites, elles sont décrites dans la partie Maillage (Chapitre 3).

##### 700 MHz

La puissance en charge moyenne d'un site-opérateur 5G dans la bande de fréquences 700 MHz est estimée à 1 kW sur l'ensemble de la période, soit une consommation annuelle moyenne de 8760 kWh.

La pénétration et la portée moyennes des *macrocells* 5G 700 MHz sont supposées égales aux *macrocells* 4G 800 MHz. C'est pourquoi, aucune *smallcell* n'accompagne ces *macrocells* 5G.

##### 3,5GHz

La consommation électrique moyenne d'un site-opérateur 5G dans la bande de fréquence 3,5 GHz est estimée à 2,3 kW en 2020, soit une consommation annuelle moyenne de 20 148 kWh. Cette consommation reste stable jusqu'en 2024 puis croît de 5% par an jusqu'à la fin de la période pour tenir compte des sites-opérateurs qui deviendront multi-bandes.

Comme évoqué dans la partie Maillage (Chapitre 3), les *macrocells* 5G dans la bande de fréquence 3,5 GHz sont équipées d'un certain nombre de *smallcells* pour améliorer la qualité de service du réseau. L'hypothèse faite est une hausse progressive de ce nombre par site-opérateur. Pour rappel, l'hypothèse faite est une croissance linéaire du nombre de *smallcells* pour atteindre trois *smallcells* par site-opérateur 5G dans la bande 3,5 GHz en 2030. La consommation électrique moyenne par *smallcell* est supposée constante dans le temps et égale à 25% de la consommation électrique moyenne en 2020 par *macrocells* 3,5 GHz, soit 5 037 kWh.

##### 26 GHz

La consommation électrique moyenne d'un site-opérateur 5G dans la bande de fréquence 26 GHz intègre une particularité. Comme évoqué dans la partie Maillage (Chapitre 3), cette

<sup>32</sup> Audition d'Hugues Ferreboeuf le 12 novembre 2020

bande de fréquence permet d'atteindre de hautes performances de débit et de latence. Toutefois, la pénétration et la portée sont limitées. C'est pourquoi, l'hypothèse posée est qu'un site 26 GHz nécessite un certain nombre de *smallcells* pour fonctionner et atteindre leur niveau de performance théorique. Ainsi, la consommation électrique d'un site-opérateur 5G dans la bande de fréquences 26 GHz comprend la consommation des équipements du site, de la ou des *macrocells* 26 GHz et d'un certain nombre de *smallcells*. La consommation électrique moyenne est donc estimée à 4 kW en 2020, soit une consommation annuelle moyenne de 35040 kWh. Compte tenu du peu d'informations disponibles sur la bande 26 GHz, la consommation est supposée stable sur l'ensemble de la période.

Génération	Consommation – 2020 (kWh)	Consommation – 2030 (kWh)
2G	4 380	4 380
3G	8 760	8 760
4G – multigénération	20 282	33 037
4G – seule	23 652	38 527
5G – 700 MHz	8 760	87 60
5G – 3,5 GHz	20 148	27 000
5G – 26 GHz	35 040	35 040

Tableau 9. Consommation électrique par site-opérateur et génération en 2020 et 2030 pour la variante de déploiement "La 5G du cahier des charges"

#### 1.4. Energie et émissions en phase amont

Aucun des quatre principaux opérateurs ne publie de données sur l'énergie grise et les émissions embarquées dans les équipements et l'infrastructure des réseaux qu'il opère. En d'autres termes, les émissions liées aux achats nécessaires pour faire fonctionner les réseaux ne sont pas rapportées dans les bilans carbone effectués pour les communications RSE de ces groupes. De plus, les équipements (antennes, appareils électriques, etc.) et éléments d'infrastructure (câbles, béton, etc.) qui composent les réseaux sont divers. C'est pourquoi – et cela malgré des données précieuses partagées par Ericsson au sujet des émissions embarquées dans ses équipements 5G – la présente étude adopte une approche synthétique. Tandis qu'une approche analytique aurait été partielle en l'état des données disponibles, une approche synthétique présente l'avantage de donner un ordre de grandeur sur l'ensemble des émissions amont des réseaux.

L'approche expliquée ci-après se déroule en deux temps.

En premier temps, nous estimons un ratio énergie primaire amont sur énergie primaire utilisation de 15%. Cette proportion est commune à plusieurs études sur l'empreinte carbone du numérique<sup>33</sup>. En d'autres termes, nous estimons que pour chaque kWh d'énergie en phase utilisation des réseaux, 0,15 kWh sont nécessaires en phase amont. Aussi, nous estimons la consommation énergétique en phase amont en multipliant simplement le résultat obtenu *supra* par le ratio de 15%.

<sup>33</sup> Voir différents travaux d'Andrae, GreenIT (2019) et The Shift Project (2019)



En second temps, un facteur d'émission (cf. Intensité carbone de l'énergie primaire dans le monde) est appliqué à l'énergie primaire en phase amont estimée en premier temps. L'encadré ci-dessous présente cette même approche en deux temps à l'aide de formules, qui s'appliquent chaque année.

La **consommation énergétique primaire** de la phase amont, en 2019, est alors égale à :

$$CP \text{ RéseauxAmont}_{2020} = CP \text{ RéseauxScope2Domestique}_{2020} * 15\%$$

L'**empreinte carbone** de la phase amont, en 2019, est alors égale à :

$$EC \text{ RéseauxAmont}_{2020} = CP \text{ RéseauxAmont}_{2020} * FE \text{ énergie primaire}_{2020} \text{ gCO}_2/\text{kWh}$$

La logique d'estimation des émissions de GES des réseaux est reprise de façon schématique ci-dessous (cf. Figure 16).

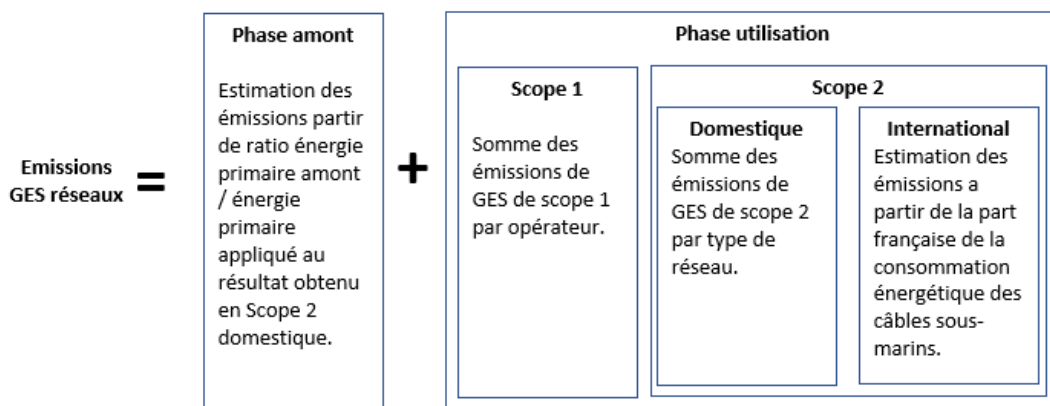


Figure 16. La méthodologie d'estimation de l'empreinte carbone des réseaux

## 2. Hypothèses sur les datacenters

Les dépenses énergétiques des datacenters qui servent les usages numériques en France peuvent être décomposées comme suit :

- Amont : énergie embarquée dans les achats d'équipements et amortie sur la durée de vie des infrastructures
- Utilisation :
  - *Scope 1* : les consommations directes de combustibles des exploitants des datacenters (ex : générateurs électriques de secours – hors champ faute de données)
  - *Scope 2* les consommations d'électricité pour le fonctionnement des serveurs et autres équipements électriques des datacenters

La question de la chaleur fatale émise par les serveurs des datacenters est uniquement traitée sous l'angle des gains d'efficacité énergétique, qui incluent les perspectives de réduction des dépenses énergétiques par les systèmes actifs de refroidissement. Cependant, la perspective de récupération de la chaleur fatale, par exemple pour être revendue sur des réseaux de chaleur, et les économies d'énergie indirectes associées n'est pas étudiée.

Les consommations d'énergie des datacenters et émissions de gaz à effet de serre associées en phases amont et utilisation dépendent du volume de données stockées et traitées, ainsi que du type de datacenter, représentatif de son efficacité énergétique. Les hypothèses posées sur ces déterminants sont détaillées ci-après.

## Evolution du trafic de données stockées et traitées

Afin d'estimer l'énergie primaire et les émissions de GES associées aux centres informatiques en phase utilisation, il convient dans un premier temps d'estimer les flux de données depuis, vers, ou à l'intérieur des centres informatiques.

Schématiquement, l'ensemble des flux de données peuvent être séparés en deux catégories (cf. Figure 17) :

- Le **trafic IP utilisateur** est estimé dans la partie « réseaux » (cf. 1.2). Il correspond au « Visual Networking Index » de la figure 5, et comprend ainsi le trafic non lié aux centres informatiques (A), c'est-à-dire notamment entre terminaux seulement, ainsi que le trafic entre les data centers et les terminaux des utilisateurs (B).
- Le trafic cloud, ou **trafic IP DC** (pour data center) correspond au « Global Cloud Index » de la figure 5 ci-dessous, et comprend ainsi le trafic entre les data center et les utilisateurs (B), le trafic entre centres informatiques (C) et le trafic à l'intérieur des centres informatiques (D).

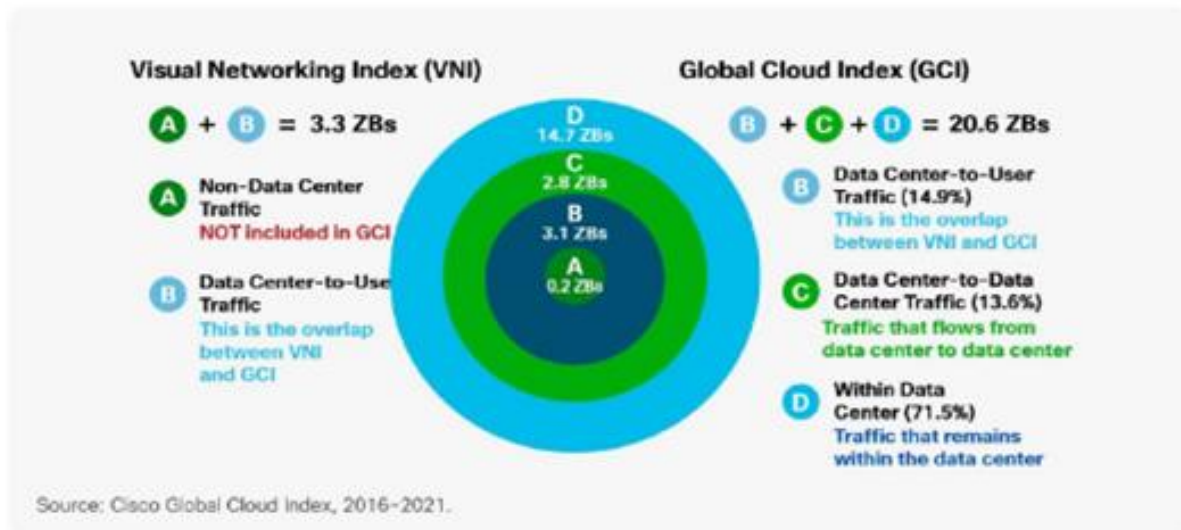


Figure 17. Les différents types de flux de données

Le **trafic IP DC** (DC pour data center) correspond ainsi au trafic de données entre centres informatiques et terminaux (B), mais aussi entre centres informatiques (C) et à l'intérieur des centres informatiques (D). A l'exclusion du trafic entre terminaux seuls (A), qui est négligeable, le trafic IP DC est un sur-ensemble du trafic IP utilisateurs. Ce trafic est directement utilisé pour l'estimation de la consommation d'énergie primaire et des émissions de GES des réseaux domestique.

Un ratio d'environ 0,15, stable dans le temps, est observé entre le trafic IP utilisateur et le trafic IP DC selon les données Cisco VNI et GCI. En d'autres termes, le trafic IP utilisateur représente environ 15% du trafic des centres informatiques. Afin d'estimer le trafic cloud,

nous divisons ainsi simplement le trafic IP utilisateur domestique (estimé dans la partie réseaux) par 0,15.

Le **trafic cloud** global attribuable à des utilisateurs français en 2019 est alors égal à :

$$T_{Cloud_{2020}} = \frac{TIP_{UtilisateurDomestique_{2020}}}{0.15}$$

Une fois le trafic cloud global attribuable à des utilisateurs français estimé, nous répartissons ce trafic en deux catégories :

- Le trafic attribuable aux centres informatiques implantés à l'étranger, pour un utilisateur français. Cela nous permet d'estimer la consommation énergétique, et les émissions de GES, issus de data centers situés hors du territoire national ;
- Le trafic attribuable aux centres informatiques implantés en France. Cela nous permet d'estimer la consommation énergétique, et les émissions de GES, issues de centres informatiques situés en France.

### Evolution des proportions de trafic par types de datacenters

Les datacenters présents en France dans les années à venir peuvent être rangés en deux catégories :

- Les datacenters « classiques » d'une part, c'est-à-dire des datacenters de taille petite à grande qui hébergent des équipements appartenant à des entreprises, en mode privatif (les locaux et serveurs appartiennent à l'entreprise) ou en colocation (les locaux et serveurs appartiennent à un hébergeur spécialisé) ;
- Les « hyperdatacenters » ou *hyperscale* d'autre part. Ce sont des datacenters de très grande taille conçus pour réaliser des économies d'échelle et gérés par des opérateurs de services « cloud ». Absents de France pour l'instant, les premiers hyperdatacenters devraient être pleinement opérationnels dès 2022 sous l'impulsion des grands fournisseurs de contenus et applications tels que les GAFAM.

Au sein la catégorie « classiques », des data centers de type *edge computing* devraient émerger. Petits et au plus proche des utilisateurs, comme par exemple sur des sites industriels, ils devraient permettre l'accélération de l'internet des objets et de l'internet industriel des objets (IoT et IIoT). Ils apparaissent en effet essentiels pour réduire la latence des télécommunications, requise pour certaines applications comme les communications entre véhicules autonomes.

Deux évolutions contraires vont donc se produire au sein du parc des datacenters, l'une d'accroissement de la taille (et de l'efficacité énergétique), l'autre de la multiplication de sites plus petits. En tout cas, la tendance est clairement à l'augmentation, dans les années à venir, du nombre et de la surface des datacenters sur le territoire français, donc au détriment en proportion de trafic d'une troisième catégorie de datacenters :

- Les datacenters qui traitent et stockent des données pour des usages français depuis l'étranger. Ils sont majoritairement de grande dimension, de type « hyperdatacenter », afin d'héberger les services dominants du Web, c'est-à-dire notamment ceux des GAFAM et de Netflix. Aujourd'hui, ils restent surtout implantés aux Etats-Unis. Ils peuvent aussi être localisés dans des pays comme l'Irlande et les Pays-Bas, d'où ils desservent l'Europe de l'Ouest.

Nous estimons la part du trafic entre terminaux en France et datacenters à l'étranger à 55% en 2019, donc majoritaire. Les 45% restants transitent dans des datacenters classiques ou *edge* situés en France.

Nous postulons que la part des hyperdatacenters à l'étranger dans le trafic cloud français va se réduire à partir de 2023 dans les mêmes proportions pour les deux scénarios et toutes les variantes :

- +0,5% en 2021 et 2022
- -5% par an de 2023 à 2030

La différence entre scénarios et variantes se situe dans la répartition des portions restantes de trafic entre hyperdatacenters en France et datacenters classiques ou *edge*. Nous considérons que les hyperdatacenters à venir en France vont traiter et stocker une part croissante des données échangées en France dans tous les scénarios, et cela plus rapidement que la décroissance de la part des hyperdatacenters à l'étranger. La part de trafic qui transite par la dernière catégorie, les datacenters classiques ou *edge*, se verrait donc réduite avec ou sans déploiement de la 5G.

Cependant, il s'agit d'estimer à quel point la tendance vers le *edge computing* ralentit cette réduction relative. En valeur absolue, les données traitées et stockées par les datacenters classiques ou *edge* continueront très certainement de croître. Puisque l'évolution vers l'*edge computing* est intimement liée à l'avènement de l'internet des objets, et que celui-ci dépend pour partie en France des capacités et performances croissantes des réseaux mobiles permises par le déploiement de la 5G, nous émettons l'hypothèse d'une réduction en proportion de trafic avec les datacenters classiques ou *edge* de 45% aujourd'hui à au plus 35% en 2030 (2250 EB de trafic *cloud*) en variante « La vraie 5G pour tous » et au minimum 24% en 2030 (850 EB) en variante « Non déploiement Bas ».

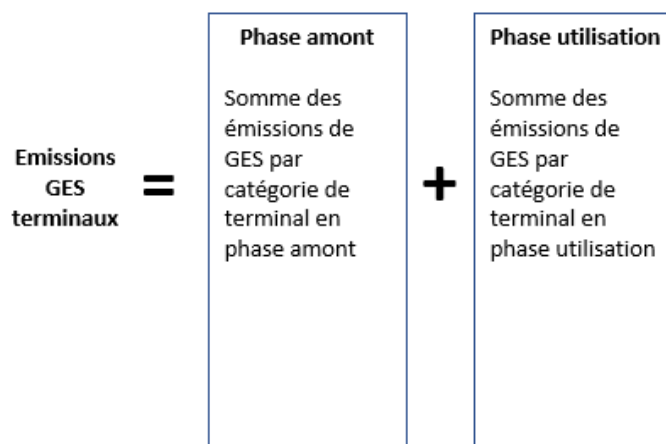
### **Energie et émissions en phase amont**

Pour les mêmes raisons, l'énergie primaire et l'empreinte carbone amont sont estimées avec une approche synthétique, qui est identique à celle employée pour les réseaux (cf. 1.4).

## **3. Hypothèses sur les terminaux**

Comme détaillé dans le Chapitre 1, seize catégories de terminaux sont prises en compte dans la modélisation. Toutefois, la revue de littérature montre que seuls cinq terminaux mobiles ou émergents parmi eux devraient être significativement impactés par le déploiement de la 5<sup>e</sup> génération mobile. Les onze autres terminaux ne connaîtront pas ou peu de variation due à la 5G ; ils sont donc appelés « les terminaux socles » dans la présente étude. En 2020, le parc total des seize terminaux numériques en France s'élève à 600 millions d'unités.

Pour l'estimation de l'empreinte carbone de tous les terminaux, nous mobilisons une approche analytique : nous nous interrogeons sur la consommation énergétique en phase amont et en phase utilisation de chaque catégorie de terminal. La phase aval de gestion de fin de vie est laissée hors champs, car les données disponibles sur cette phase du cycle de vie sont insuffisantes d'une part, et d'autre part car les ordres de grandeur d'émissions de GES associées apparaissent comme négligeables au regard des émissions des autres phases. L'empreinte carbone d'un terminal numérique correspond ainsi à la somme des dépenses énergétiques en phases amont et utilisation, multipliées chacune par des facteurs d'émission spécifiques (cf. Figure 18). Ces facteurs sont définis dans la partie suivante : « Facteurs d'émissions ».



*Figure 18. La méthodologie d'estimation de l'empreinte carbone des terminaux*

### En phase amont

En phase amont, trois données clés sont nécessaires :

- Le **volume d'achats** : correspond aux ventes de chaque catégorie de terminal en France en 2020. Pour les montres connectées, par exemple, le volume d'achats est estimé à 3 075 652 unités en 2020. Cette estimation est obtenue par des recoupements entre projections à partir de données de ventes historiques et estimations à partir d'hypothèses de parc et de durée de vie, qui sont approximativement liées par la formule suivante :

$$Volume\ d'achat_{2020} = Parc\ Actif_{2020} - Parc\ Actif_{2019} * \left(1 - \frac{1}{Durée\ d'utilisation_{2020}}\right)$$

- L'**énergie primaire** correspond à la quantité d'énergie, pour chaque catégorie de terminal, employée lors de la phase amont du cycle de vie (correspondant notamment aux extractions de matériaux, la production des composantes matérielles des systèmes et la distribution). Pour les montres et bracelets connectés, par exemple, l'énergie primaire est estimée à 140 MJ par unité à partir notamment d'une ACV de la Samsung Galaxy Watch.
- Les **émissions amont** correspondent aux émissions, pour chaque catégorie de terminal, lors de la phase amont du cycle de vie. Ces données sont issues d'analyses en cycle de vie par terminal, plus fines que la simple multiplication de la quantité d'énergie primaire par l'intensité carbone moyenne de l'énergie primaire. Pour les montres et bracelets connectés, par exemple, les émissions amont sont estimées à 9,72 kgCO<sub>2</sub> par unité.

### En phase d'utilisation

En phase utilisation, quatre données clés sont nécessaires :

- Le **parc actif** représente le nombre de terminaux, pour chaque catégorie de terminal, utilisés en France en 2020. On note que ce parc actif peut être estimé de plusieurs façons différentes à partir de :
  - La **durée de vie** et le **volume d'achat** historique du périphérique étudié. C'est par exemple le cas des imprimantes. En mobilisant une

durée de vie moyenne de six ans, ainsi que les données de ventes des six dernières années, le parc actif est estimé à 22 981 494 unités.

- Une hypothèse ad-hoc : c'est par exemple le cas des écrans, pour lequel nous posons l'hypothèse, suivant le CGE (2019), d'un écran par ordinateur fixe et de 0,3 écrans par ordinateur portable. Le parc actif des écrans est ainsi estimé à 37 324 278 unités en 2019.
  - Des taux d'équipement et de multi-équipement des ménages ou individus : c'est par exemple le cas pour les smartphones, les casques de réalité virtuelle, les lunettes de réalité augmentée et les montres connectées.
- La **consommation d'électricité annuelle** représente la consommation électrique, en kWh, associée à l'utilisation moyenne, sur un an, pour chaque catégorie de terminal. Pour les modules de connexion IoT et IIoT, celle-ci est estimée à 12,45 kWh en 2020.

La **consommation énergétique primaire** (*CP* ci-dessous), en 2020, pour chaque catégorie de terminal, est alors égale à :

$$CP_{Terminal_{2020}} = (VolumeAchats_{2020} * EnergiePrimaireAmont_{2020}) + (ParcActif_{2020} * ConsommationElectriqueAnnuelle * 2,58)$$

L'**empreinte carbone** en 2020 (*EC* ci-dessous), pour chaque catégorie de terminal, est alors égale à :

$$EC_{Terminal_{2020}} = (VolumeAchats_{2020} * EmissionsAmont) + (ParcActif_{2020} * ConsommationElectriqueAnnuelle * 57,1gCO2eq/kWh)$$

Pour les terminaux du socle, non affectés par le déploiement de la 5G, les hypothèses d'évolution des variables nécessaires à l'estimation des phases amont et utilisation sont communes aux scénarios de déploiement et de non-déploiement. La revue de littérature nous a permis de poser des hypothèses sur ces variables pour chaque terminal.

La logique de chacune de ces hypothèses est représentée schématiquement dans la Figure 19 et développée dans le rapport de la mission réalisée par Citizing pour le Sénat en Juin 2020, portant sur l'empreinte environnementale du numérique français<sup>34</sup>.

#### *Volume d'achats / durée de vie / Parc actif*

Dans les paragraphes précédents, nous avons expliqué que le volume d'achats, la durée de vie et le parc actif sont liés. Leur rythme d'évolution se suit logiquement. Par exemple, le volume d'achats et le parc actif d'imprimantes sont croissants, la durée de vie est alors décroissante. Autre exemple, le volume d'achats d'ordinateurs fixes est croissant et le parc actif est constant. Cette situation correspond à un renouvellement précoce du terminal, c'est-à-dire à une diminution de la durée de vie.

#### *Energie primaire / Emissions amont*

La consommation d'énergie primaire et l'émission de gaz à effet de serre émis sont croissantes pour tous les terminaux du socle, sauf pour les ordinateurs portables et fixes. Ces hypothèses ont été posées en s'appuyant sur les données historiques observées et obtenues à partir d'organismes publics de constructeurs ou des deux. Par exemple, l'évolution des

<sup>34</sup> « [Empreinte carbone du numérique en France : des politiques publiques suffisantes pour faire face à l'accroissement des usages ?](#) », Citizing (2020)

émissions de GES des ordinateurs portables utilise notamment des données d'Apple<sup>35</sup> et de l'ADEME<sup>36</sup>.

### Consommation électrique annuelle

L'évolution de la consommation d'électricité annuelle de chaque terminal est déterminée à partir des gains d'efficacité énergétique et de l'accroissement du temps d'utilisation du terminal envisagés ou observés par le passé dans la revue de littérature. Par exemple, l'association Négawatt prévoit une baisse d'environ 3,8% par an de la consommation d'électricité des consoles, malgré une durée d'utilisation moyenne constante<sup>37</sup>.

Pour chaque terminal, le sens d'évolution des paramètres d'estimation est représenté ci-dessous (cf. Figure 19).

Terminaux "non mobile"	Volume d'achats	Durée de vie	Energie primaire	Emissions amont	Consommation électrique annuelle	Parc actif
Ordinateurs portables	→	→	↓	↓	↓	→
Ordinateurs fixes	↗	↓	↓	↓	↓	→
Ecrans	↗	non-estimé	↗	↗	→	↗
Téléviseurs	↗	→	↗	↗	↓	↗
Box	→	non-estimé	↗	↗	→	→
Tablettes	↗	→	↗	↗	↗	↗
Consoles de jeu salon	↗	non-estimé	↗	↗	↓	↗
Consoles de jeu portables	↓	non-estimé	↗	↗	↓	↓
Imprimantes	↓	→	↗	↗	↗	↓
Enceintes connectées	↗	↓	↗	↗	→	↗
Ecrans publicitaires	↗	↓	↗	↗	→	↗

Figure 19. Représentation du sens d'évolution des paramètres d'estimation des terminaux du socle commun

Concernant les cinq terminaux mobiles ou émergents, des hypothèses différenciées par scénario ont été posées. Selon le terminal, l'hypothèse différenciante porte soit sur la durée de vie, soit sur le taux d'équipement ou bien encore sur les taux de croissance annuels moyen des ventes et du parc. La logique de ces hypothèses sont présentées ci-dessous, pour chaque terminal.

### Les smartphones

Pour les smartphones, l'hypothèse différenciante porte sur la durée de vie. Dans le scénario de déploiement, la durée de vie diminue jusqu'en 2023 pour refléter l'appétence des utilisateurs pour la dernière génération mobile. Cette diminution correspond à un renouvellement précoce des smartphones.

Après 2023, la durée de vie augmente ou stagne selon la variante pour refléter la poursuite ou la fin de cette période de renouvellement plus rapide de ces terminaux (cf. Tableau 10).

<sup>35</sup> [Fiches environnementales des appareils Apple](#)

<sup>36</sup> [Base carbone](#), ADEME

<sup>37</sup> « [Scénario négaWatt 2017-2050 : hypothèses et résultats](#) », Association négaWatt (2018)

Dans le scénario de non-déploiement, la durée de vie au contraire augmente. Elle atteint 3,1 ans en variante haute, et 3,3 ans en variante basse. Cette augmentation reflète la poursuite de l’allongement de la durée d’utilisation des smartphones actuellement constatée.

Variante	2020	2023	2025	2030
La vraie 5G pour tous	2,59	2,19	2,19	2,44
La 5G du cahier des charges	2,59	2,34	2,44	2,69
La 5G sélective	2,59	2,49	2,69	2,94
Le non-déploiement HAUT	2,59	2,74	2,84	3,09
Le non-déploiement BAS	2,59	2,87	3,03	3,33

Tableau 10. Evolution de la durée moyenne d'utilisation des smartphones par variante

Les empreintes énergétiques des smartphones sont différenciées entre scénario seulement en phase amont (cf. Figure 20).

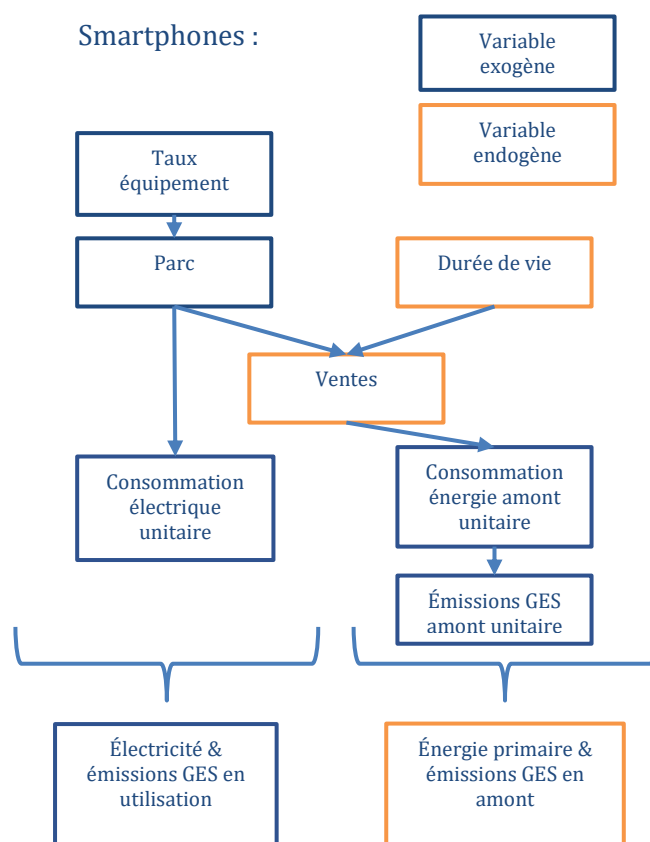


Figure 20. Approche de modélisation pour les projections sur les smartphones

Les autres paramètres d’estimation de l’empreinte environnementale des smartphones sont tous supposés croissants sur la période d’analyse. En effet, la hausse de ces paramètres reflète le développement des usages (Cloud Gaming, vidéo en streaming, etc.),



l'augmentation du temps d'utilisation (+27% entre 2017 et 2019) et la technicité croissante de ce terminal<sup>38</sup>.

## Les casques VR

Pour les casques de réalité virtuelle, l'hypothèse différenciante porte sur le taux d'équipement des individus de 12 ans et plus. La différence entre taux permet de refléter l'incertitude quant à l'adoption de ces équipements émergents, corrélée aux caractéristiques du réseau. En effet, la 5G permet de développer les usages de la réalité virtuelle<sup>39</sup> en levant des verrous technologiques, tels que la puissance de calcul embarquée grâce au fonctionnement en cloud. Toutefois, les usages futurs de cet appareil et leur adoption massive ou non restent incertains.

Variante	2020	2025	2030
La vraie 5G pour tous	1,4%	13,7%	40%
La 5G du cahier des charges	1,4%	10,8%	30%
La 5G sélective	1,4%	7,9%	20%
Le non-déploiement HAUT	1,4%	6,5%	15%
Le non-déploiement BAS	1,4%	5,1%	10%

*Tableau 11. Evolution du taux d'équipement des individus de 12 ans et plus en casques de réalité virtuelle par variante*

Les autres paramètres d'estimation de l'empreinte environnementale sont tous supposés croissants, sauf la durée de vie qui est supposée constante. L'énergie primaire et les émissions amont augmentent pour refléter la progression du niveau de technicité du terminal. Quant à l'augmentation de la consommation électrique annuelle, elle reflète le développement des usages et la hausse du temps d'utilisation à prévoir dans les futures années. En effet, le recours à ce terminal tend à se généraliser dans notre quotidien, que ce soit en entreprise ou par des particuliers.

## Les lunettes AR

Pour les lunettes de réalité augmentée, l'hypothèse différenciante porte sur le taux d'équipement des individus de 16 ans et plus. Comme pour les casques de réalité virtuelle, la distinction entre ces taux permet de refléter l'incertitude quant à l'adoption de ces équipements émergents. Là aussi, en levant des verrous technologiques, la 5G permet de développer les usages de la réalité augmentée. Toutefois, l'intérêt des utilisateurs pour cette technologie reste incertain. Le rôle du déploiement de la 5G nous est apparu tout à fait déterminant puisque les applications de réalité augmentée devraient bénéficier de toutes les promesses de la 5G en matière de débit, latence et densité, et tout cela en mobilité. De plus, les lunettes (l'objet qui sert de support et qui pourrait se voir remplacé dans sa version non-

<sup>38</sup> « [Assessing ICT global emissions footprint: Trends to 2040 & recommendations](#) », L.Belkhir and al (2017)

<sup>39</sup> « [Cloud AR/VR streaming](#) », GSMA (2019) ; « [The Arrival Of 5G Will Unlock The Full Potential Of VR And AR](#) », Forbes (2019)

numérique) sont portées par 70% des Français, ce qui pourrait indiquer un potentiel d'adoption important. Dans le scénario « La vraie 5G pour tous », l'hypothèse de 45% de taux d'équipement peut sembler haute compte tenu de l'adoption actuelle (0,3%). Toutefois, avec cette hypothèse, l'empreinte carbone en 2030 reste limitée, environ 1% des émissions totales des terminaux, comme nous le verrons dans le chapitre 4.

Variante	2020	2025	2030
<b>La vraie 5G pour tous</b>	0,3%	13,7%	45%
<b>La 5G du cahier des charges</b>	0,3%	10,8%	35%
<b>La 5G sélective</b>	0,3%	6,6%	20%
<b>Le non-déploiement HAUT</b>	0,3%	3,1%	8%
<b>Le non-déploiement BAS</b>	0,3%	2,3%	5%

*Tableau 12. Evolution du taux d'équipement des individus de 16 ans et plus en lunettes de réalité augmentée par variante*

Comme pour les casques de réalité virtuelle, les autres paramètres d'estimation de l'empreinte environnementale sont tous supposés croissants, sauf la durée de vie qui est supposée constante. L'énergie primaire et les émissions amont augmentent pour refléter la progression du niveau de technicité du terminal. Quant à l'augmentation de la consommation électrique annuelle, elle reflète le développement des usages et la hausse du temps d'utilisation à prévoir dans les futures années. En effet, le recours à ce terminal tend à se généraliser dans notre quotidien, que ce soit en entreprise ou par des particuliers.

### **Les montres et bracelets connectés**

Pour les montres et bracelets connectés, l'hypothèse différenciante porte sur le taux d'équipement des individus de 12 ans et plus. Comme pour les casques de réalité virtuelle, la distinction de ces taux permet de refléter l'incertitude quant à l'adoption de ces équipements. En effet, la revue de littérature montre que les nouveaux usages, tels que ceux liés au sport et à la santé, pourront être dynamisés par l'arrivée de la 5G<sup>40</sup>. C'est pourquoi l'adoption de ce terminal a été modélisée en suivant notamment le déploiement de la 5G. Par exemple, dans la variante « La 5G pour tous » du scénario de déploiement, le taux d'équipement est de 70% en 2030 et de 45% dans la variante « la 5G sélective » (cf. Tableau 13). Toutefois, l'intérêt des utilisateurs et les applications réelles restent incertains.

<sup>40</sup>« [Smartwatch Market Forecasts to 2030 - Global Sales of 722.12 Million Units is Projected for 2030: Garnering \\$109+ Billion in Revenues](#) », ResearchandMarkets (2020) ; « [Les montres connectées gagnent en popularité](#) », ZDNet (2018)

Variante	2020	2025	2030
<b>La vraie 5G pour tous</b>	14,3%	42,2%	70%
<b>La 5G du cahier des charges</b>	14,3%	34,7%	55%
<b>La 5G sélective</b>	14,3%	29,7%	45%
<b>Le non-déploiement HAUT</b>	14,3%	29,7%	45%
<b>Le non-déploiement BAS</b>	14,3%	24,7%	35%

*Tableau 13. Evolution du taux d'équipement des individus de 12 ans et plus en montres et bracelets connectés par variante*

Nous avons regroupé les montres et bracelets connectés en une seule catégorie, plus simple et plus robuste, en faisant la somme des parcs actifs de chacun de ces terminaux et en choisissant des valeurs centrales concernant les hypothèses unitaires : consommation électrique annuelle, énergie embarquée et émissions amont.

Ces trois paramètres d'estimation de l'empreinte environnementale sont supposés stables sur l'ensemble de la période. En effet, la revue de littérature n'a pas permis de faire des hypothèses d'augmentation ou de diminution de l'énergie primaire, des émissions amont et de la consommation électrique annuelle. Les paramètres suivants sont donc considérés stables :

- Énergie primaire : 140 MJ / unité (Nguyen Vo et al, 2020) ;
- Émissions amonts : 9,72 kgCO<sub>2</sub>eq / unité (ADEME, 2018) ;
- Consommation électrique annuelle : 4,50 kWh / unité (Nguyen Vo et al, 2020)

La même approche est employée pour modéliser les trajectoires des casques VR, lunettes AR, et montres et bracelets connectés (cf. Figure 21).

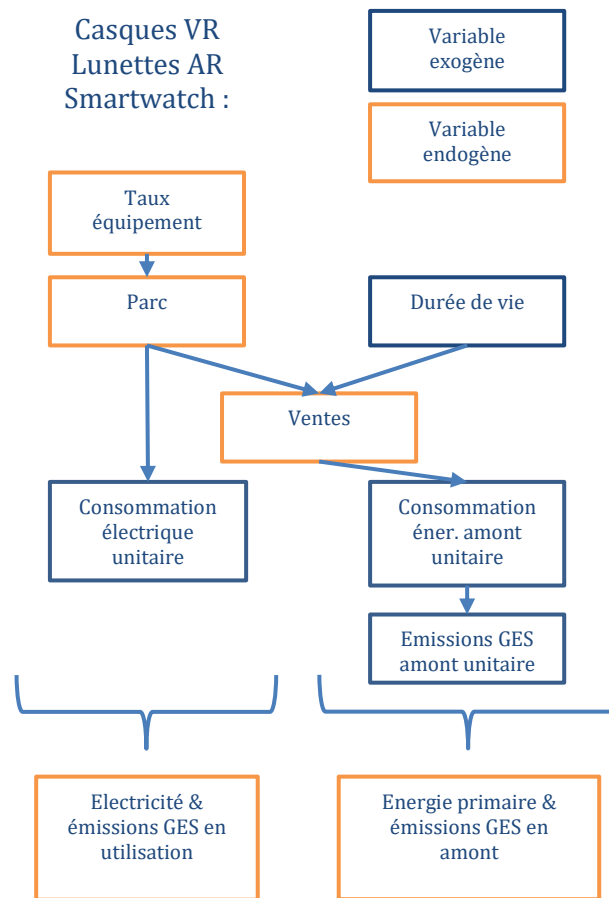


Figure 21. Approche de modélisation pour les projections des casques VR, lunettes AR et Smartwatch

## Modules de connexion IoT et IIoT

Pour les modules de connexion IoT et IIoT, l'hypothèse différenciante entre les variantes porte sur les taux de croissance annuel moyen des ventes et du parc. De cette manière, il est possible de modéliser un plus ou moins fort développement des modules de connexion IoT et IIoT. En effet, la revue de littérature montre que les objets connectés vont se généraliser et prendre une place de plus en plus importante de notre quotidien. Le nombre d'objets et machines connectés devrait être multipliés par 2 à 5 selon les études<sup>41</sup> d'ici 2025. La 5G est certes nécessaire pour l'émergence d'une partie minoritaire de ces objets et machines connectés (ceux qui sont mobiles et qui nécessitent une faible latence ou une grande fiabilité permise par le *network slicing*, soit seulement un cinquième des objets d'après un entretien avec Ericsson<sup>42</sup>), mais la compatibilité des modules de connexion avec le nouveau standard 5G devrait largement accélérer l'offre et la demande d'objets connectés, pour des raisons de coûts et de commodité. C'est pourquoi, le déploiement de la 5G ne guidera pas à elle seule le développement de ces quasi-terminaux, mais elle pourrait bien contribuer à les rendre omniprésents : il y aurait 50 objets connectés par Français de plus de 16 ans en 2030 dans

<sup>41</sup> Exemples : « *5G networks in IoT* », Juniper Research (2020/02) ; « *The 5G era* », McKinsey (2020/01) ; « *Empreinte environnementale du numérique mondial* », GreenIT (2019/09)

<sup>42</sup> Audition par le HCC de M Viktor ARVIDSSON, Global Account Manager OSS, GCU Orange chez Ericsson, 20 novembre 2020

« La vraie 5G pour tous » contre environ 5 aujourd’hui en suivant les hypothèses de croissance du parc (cf. Tableau 14).

Variante		2020	2025	2030
La vraie 5G pour tous	TCAM Ventes	15%	30%	30%
	TCAM Parc	15%	28%	28%
La 5G du cahier des charges	TCAM Ventes	15%	20%	20%
	TCAM Parc	15%	19%	19%
La 5G sélective	TCAM Ventes	15%	12%	12%
	TCAM Parc	15%	11%	11%
Le non-déploiement HAUT	TCAM Ventes	15%	10%	10%
	TCAM Parc	15%	9%	9%
Le non-déploiement BAS	TCAM Ventes	15%	8%	8%
	TCAM Parc	15%	8%	8%

Tableau 14. Evolution du taux de croissance annuel moyen des ventes et du parc de modules IoT et IIoT par variante

Les autres paramètres d’estimation de l’empreinte environnementale sont tous supposés croissants, sauf la consommation électrique unitaire annuelle qui est supposée décroissante. L’énergie primaire et les émissions amont unitaires augmentent pour refléter la progression du niveau de technicité du terminal. Quant à elle, la baisse de la consommation électrique unitaire reflète les gains d’efficacité énergétique attendus et observés dans la littérature scientifique<sup>43</sup>.

Les sens d’évolution des paramètres d’estimation de l’empreinte environnementale des terminaux « mobiles » sont présentés ci-dessous (cf. Figure 22).

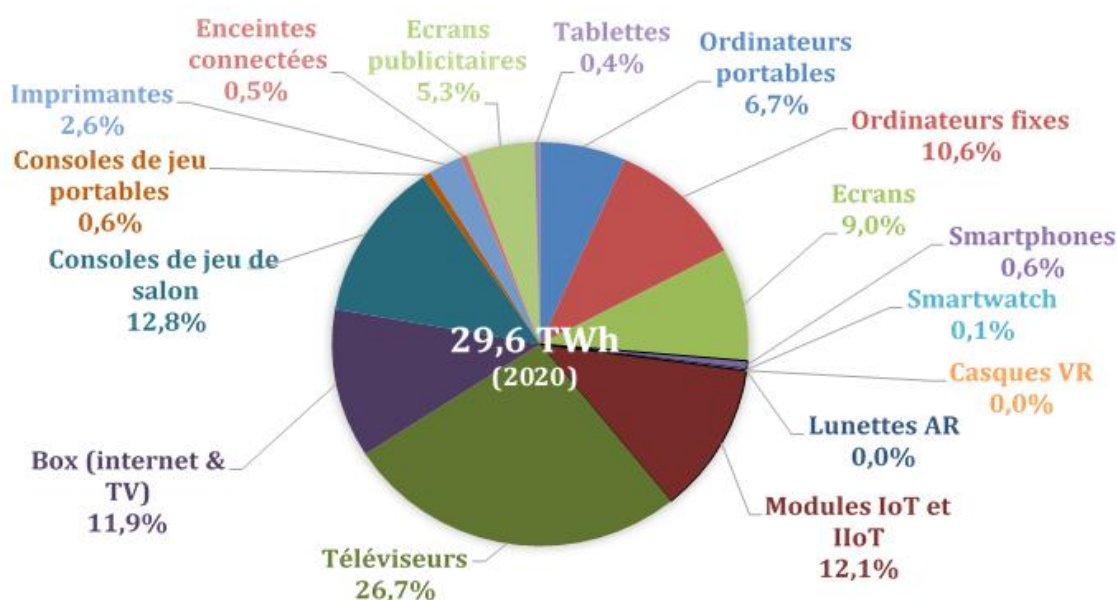
Terminaux "mobile"	Volume d'achats	Durée de vie	Energie primaire	Emissions amont	Consommation électrique annuelle	Parc actif
Smartphones	↗	↗	↗	↗	↗	↗
Modules de connexion IOT	↗	non-estimé	↗	↗	↘	↗
Casques de réalité virtuelle	↗	→	↗	↗	↗	↗
Lunettes de réalité augmentée	↗	→	↗	↗	↗	↗
Montres et bracelets connectés	↗	→	→	→	→	↗

Figure 22. Représentation du sens d’évolution des paramètres d’estimation des terminaux "mobiles"

En 2020, la consommation électrique des terminaux est estimée à 29,6 TWh (cf. Graphique 2). Les terminaux du socle commun consomment 87% de cette électricité. Parmi ces onze terminaux, ce sont les téléviseurs qui consomment la part la plus importante : 9,6 TWh. La

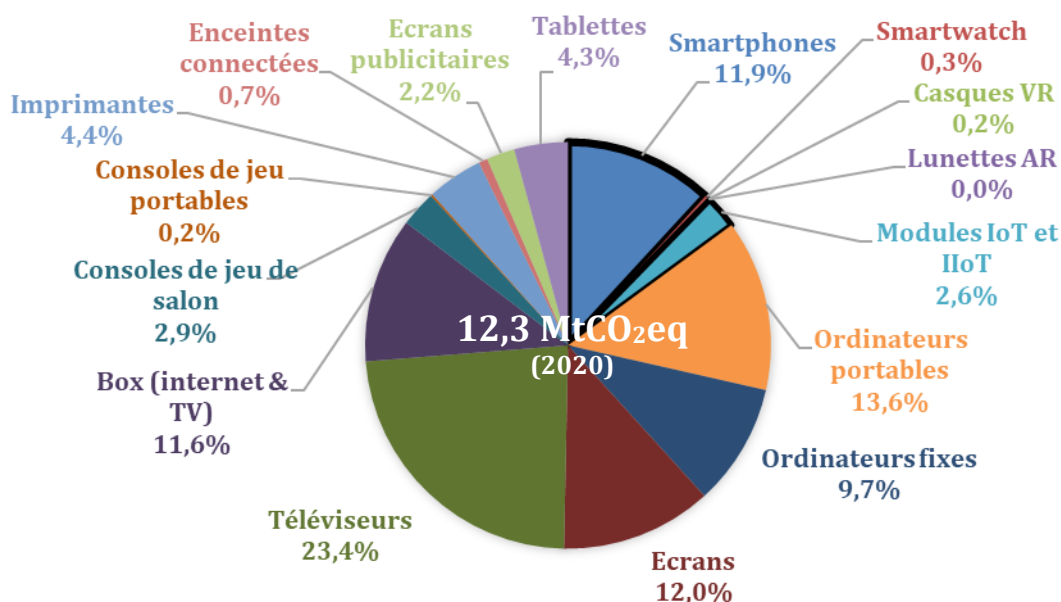
<sup>43</sup> Energy Efficiency of the Internet of Things - Technology and Energy Assessment Report, IEA/EDNA, 2016

consommation des terminaux mobiles ou émergents est quant à elle estimée à 3,8, dont 3,6 TWh par les modules de connexion IoT et IIoT.



Graphique 2. Consommation d'électricité par terminal en 2020

En 2020, les émissions de gaz à effet de serre des terminaux sont estimées à 12,3 MtCO<sub>2</sub>eq. Les terminaux mobiles ou émergents sont responsables de 14,9% des émissions totales des terminaux (cf. Graphique 3), soit 1,8 MtCO<sub>2</sub>eq. Parmi ces cinq terminaux, les smartphones émettent 1,5 MtCO<sub>2</sub>eq, soit la quasi-totalité des émissions de GES de ce groupe. Quant aux terminaux du socle commun, les émissions de GES dues aux phases amont et utilisation sont estimées à 10,5 MtCO<sub>2</sub>eq, dont 27% par les téléviseurs.



Graphique 3. Emissions de gaz à effet de serre par terminal en 2020

## 4. Facteurs d'émissions

### 4.1. Intensité carbone de l'électricité consommée en France

Pour la France, l'intensité carbone de l'électricité retenue par cette mission est de 57,1 grammes d'équivalent CO<sub>2</sub> par kilowattheure (57,1gCO<sub>2</sub>eq/kWh) consommé en 2018, comme indiqué par l'ADEME (Base Carbone). Cette estimation de l'ADEME est construite à l'aide d'une moyenne pondérée de la consommation d'électricité des 4 années précédentes (2018 incluse), corrigée des variations climatiques. Les émissions associées à cette consommation incluent la phase amont (« l'amont des combustibles, l'amortissement de la centrale et les émissions annexes de fonctionnement »<sup>44</sup>), la phase utilisation avec la combustion d'énergies fossiles, et les pertes sur les réseaux de transport (Rte) et distribution d'électricité (Enedis). Bien que cela ne soit pas mentionné explicitement par l'ADEME, l'estimation inclut a priori les émissions associées aux importations d'électricité (souvent plus carbonées) et exclut les émissions en France associées aux exportations.

#### *Absence de trajectoire*

**Il n'existe pas de trajectoire officielle de l'intensité carbone de l'électricité consommée en France**, dans le sens où, à notre connaissance, aucune autorité publique, établissement, entreprise ou autre organisation importante dans le secteur de l'énergie en France ne pose d'objectifs ni de projections scénarisées sur ce paramètre. Ni la Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC), ni la Programmation Pluriannuelle de l'Energie (PPE), ni même les scénarios de transition énergétique de Rte rendus publics ne définissent de trajectoire sur les émissions complètes du secteur électrique, phase amont comprise, et encore moins selon le mode de calcul adapté à la consommation plutôt qu'à la production d'électricité en France.

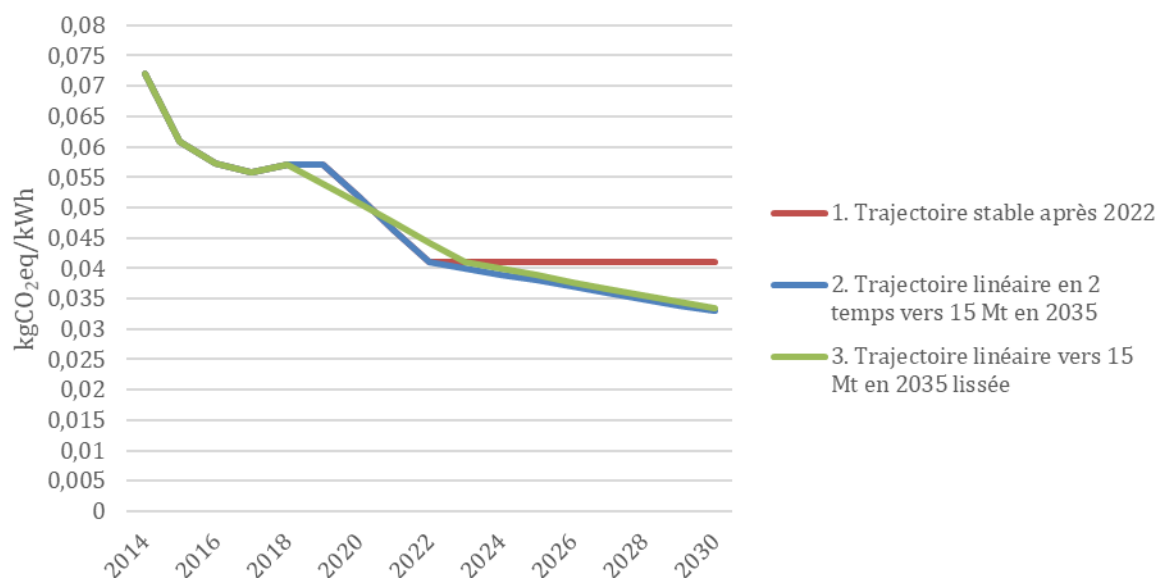
#### *Hypothèses sous-jacentes à notre trajectoire*

En raison de l'absence de trajectoire officielle, il a été nécessaire, pour les besoins de la présente étude, de poser des hypothèses d'évolution. Celles-ci sont fondées sur des échanges avec l'ADEME, à l'occasion d'une précédente mission<sup>45</sup> et sur des projections tendanciennes. Nous supposons une **réduction rapide de cette intensité carbone sur la période récente et à court terme (2019 à 2023) au rythme de -6% par an environ**, notamment grâce à la fermeture des centrales au charbon. Nous supposons ensuite un ralentissement de cette **réduction autour de 3% par an jusque 2030**. Ainsi, en 2035, le système électrique français produirait 650 TWh d'électricité et tendrait vers 15 MtCO<sub>2</sub>eq d'émissions (toutes phases confondues et négligeant les échanges internationaux). Ces hypothèses correspondent à la trajectoire verte présentée ci-dessous (cf. Graphique 4). La trajectoire rouge est utilisée en analyse de sensibilité, présentée dans le chapitre 5.

<sup>44</sup> [Base Carbone](#), ADEME, 2018

<sup>45</sup> Entretien avec M. Raphael Guastavi, ADEME, Chef de service adjoint, Service Produits & Efficacité Matière, 2 juin 2020, mission réalisée par Citizing pour le Sénat, « [Empreinte carbone du numérique en France : des politiques publiques suffisantes pour faire face à l'accroissement des usages ?](#) »

## Résultat graphique



Graphique 4. Nouvelle trajectoire de l'intensité carbone de l'électricité consommée en France

### 4.2. Intensité carbone de l'électricité consommée à l'étranger

L'intensité carbone de l'électricité à l'étranger utilisée est celle des États-Unis. En 2019, The Shift Project estime cette intensité carbone à 493gCO<sub>2</sub>eq/kWh<sup>46</sup>. Cette valeur est utilisée car un **nombre important de datacenters qui servent la France** aujourd'hui sont localisés aux États-Unis.

#### Trajectoire

L'hypothèse de trajectoire entre 2019 et 2030 pour ce facteur d'émission est une **baisse de 3,4% par an**. C'est à peu près la moitié du rythme de décroissance de l'intensité carbone des USA entre 2018 et 2030 selon le *Sustainable Development Scenario* de l'Agence Internationale de l'Énergie (IEA, 2020)<sup>47</sup>. Nous proposons une baisse moins rapide que le scénario cible de l'IEA, car ce dernier est par définition optimiste. En effet, toujours selon l'IEA, l'intensité carbone de la production d'électricité dans le monde n'a diminué que de 2,5% en 2019, au lieu des 5,6% espérés par an jusque 2030. De plus, comme en France, nous cherchons à mobiliser l'intensité carbone de l'électricité consommée et non produite aux États-Unis, et sur l'ensemble du cycle de vie des moyens de production et de distribution, pas seulement la consommation de combustibles. Pour toutes ces raisons, nous dévions de l'IEA avec 476g contre 365gCO<sub>2</sub>eq/kWh en 2020 et 337g contre 163gCO<sub>2</sub>eq/kWh en 2030.

### 4.3. Intensité carbone de l'énergie primaire dans le monde

La dernière intensité carbone n'est pas exactement comparable aux précédentes, parce qu'elle recouvre des formes d'énergie primaire et secondaire multiples. Il s'agit d'une moyenne mondiale, la plus à même de **s'appliquer aux émissions amont des**

<sup>46</sup> « [Lean ICT – Pour une sobriété numérique](#) », The Shift Project (2020)

<sup>47</sup> « [Tracking Power 2020 : Not on track](#) », IEA, Juin 2020



**télécommunications** qui sont particulièrement fragmentées, diverses et globalisées (cf. Energie et émissions en phase amont).

Nous retenons une **intensité carbone de l'énergie primaire dans le monde avec 0,059 kgCO<sub>2</sub>eq/MJ en 2020 et 0,055 kgCO<sub>2</sub>eq/MJ en 2030** conformément aux estimations d'Andrae (2020). A titre de comparaison avec les intensités carbone précédentes, ces valeurs correspondent respectivement à 0,212 et 0,198 kgCO<sub>2</sub>eq/kWh (en énergie primaire). Andrae s'appuie sur des statistiques de British Petroleum<sup>48</sup> pour évaluer la consommation mondiale d'énergie primaire à 602 Exajoules (EJ) en 2020 et 727 EJ en 2030, et les émissions de gaz à effet de serre à 35,5 GtCO<sub>2</sub>eq en 2020 et 40,3 GtCO<sub>2</sub>eq en 2030.

<sup>48</sup> [« Statistical Review of World Energy », BP, 2019](#)

# Chapitre 4 : Résultats par scénario

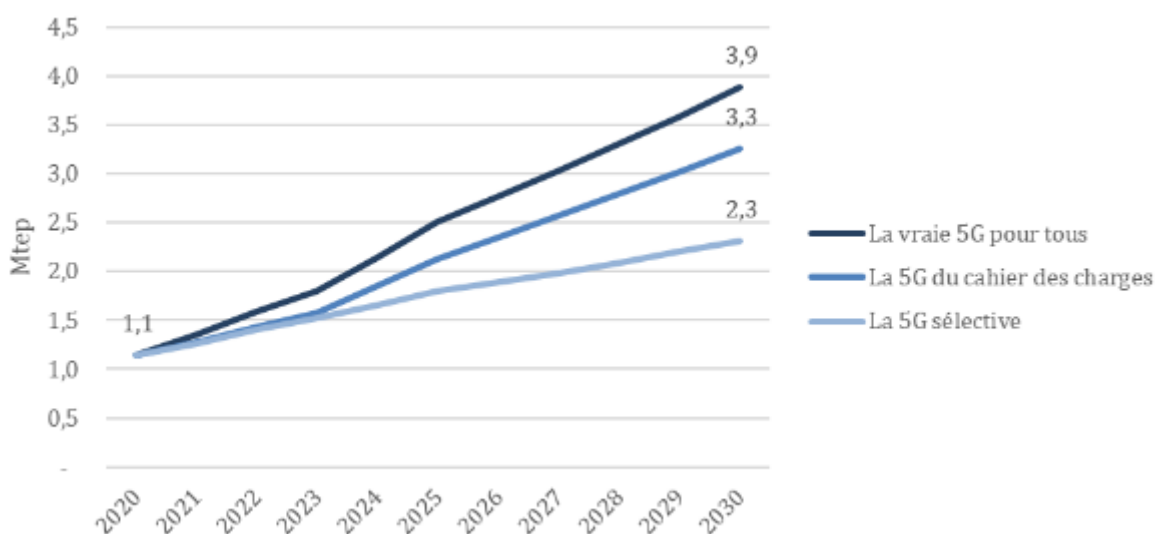
Ce chapitre 4 expose les résultats par scénario et par sous-ensemble. Les commentaires de ces résultats et les comparaisons entre scénario de déploiement et scénario de non-déploiement figurent dans le chapitre 5.

Chaque sous-section du présent chapitre est organisée de la même façon : évolution de la consommation d'énergie primaire de chaque variante, évolution de la consommation d'électricité dans chaque variante, puis évolution de l'empreinte carbone de chaque variante.

## 1. Scénario de déploiement

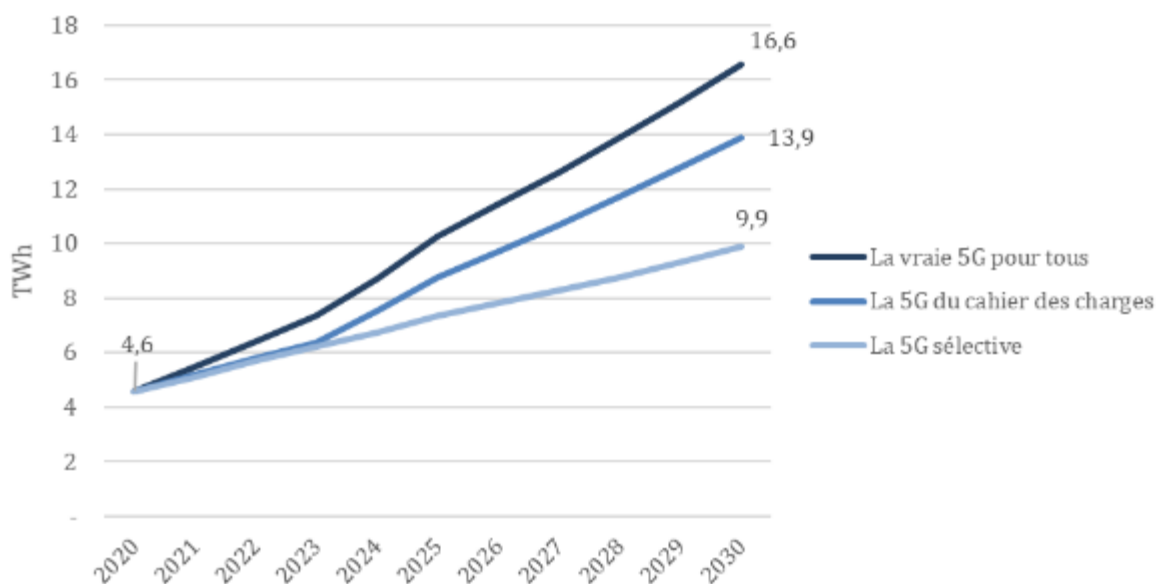
### 1.1. Les réseaux

En scénario de déploiement, les consommations d'énergie primaires des réseaux mobiles et leurs consommations d'électricité vont croître rapidement, alors qu'elles étaient auparavant stables autour de 1 Mtep (environ 11,7 TWh) de 2014 à 2019.



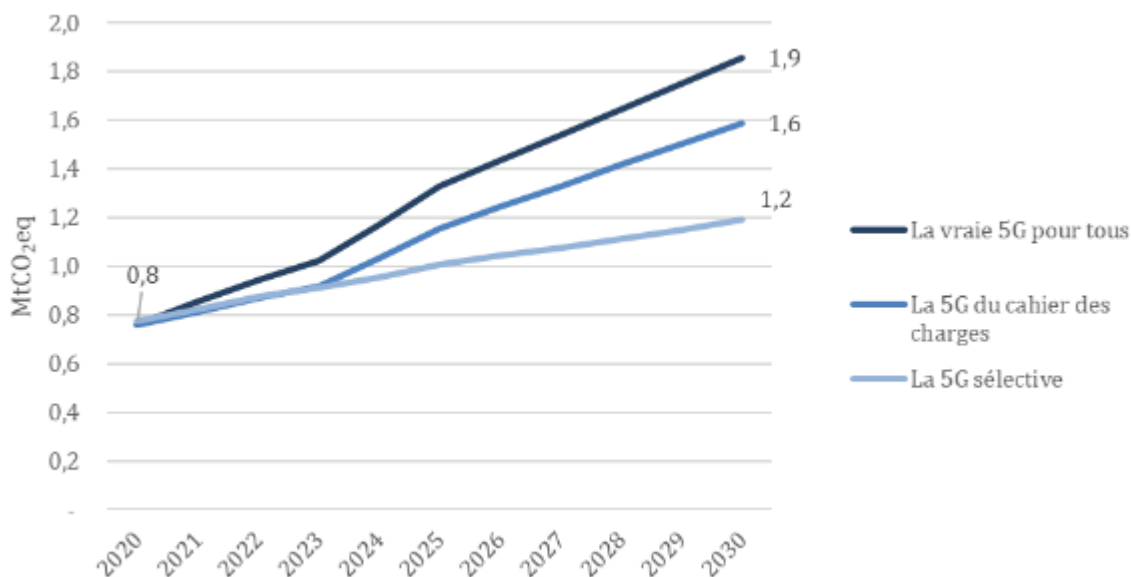
Graphique 5. Consommation d'énergie primaire des réseaux par variante du scénario de déploiement

Par construction, l'évolution de la consommation d'énergie primaire suit largement celle de l'électricité en utilisation, et celle-ci devrait croître rapidement, à mesure que le déploiement de la 5G ajoute une nouvelle couche aux réseaux mobiles préexistants.



Graphique 6. Consommation d'électricité en France des réseaux par variante du scénario de déploiement, en TWh

Le socle commun des émissions *scope 1* des opérateurs et la baisse des facteurs d'émission mobilisés que sont l'intensité carbone de l'électricité consommée en France (cf. chapitre 3, 4.1) et l'intensité carbone de l'énergie primaire dans le monde (cf. chapitre 3, 4.3) expliquent pourquoi la croissance des émissions de gaz à effet de serre des réseaux n'est pas aussi rapide que celle de l'énergie.

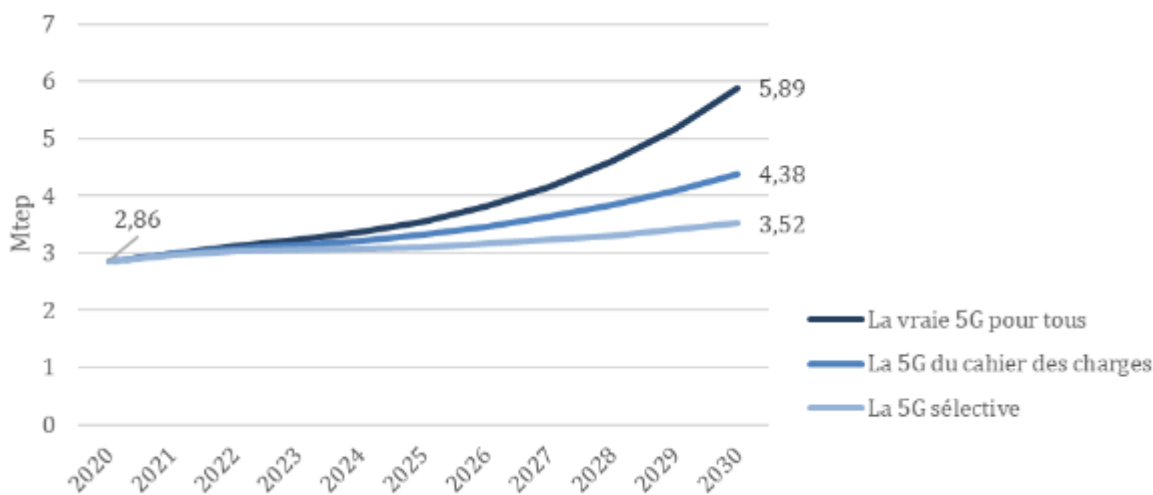


Graphique 7. Emissions de gaz à effet de serre des réseaux par variante du scénario de déploiement

Les émissions cumulées des réseaux sur la période 2021 à 2030 s'élèveraient à 13,7 MtCO<sub>2</sub>eq en déploiement de « La vraie 5G pour tous », 12 MtCO<sub>2</sub>eq pour « La 5G du cahier des charges » et 10,1 MtCO<sub>2</sub>eq pour « La 5G sélective ».

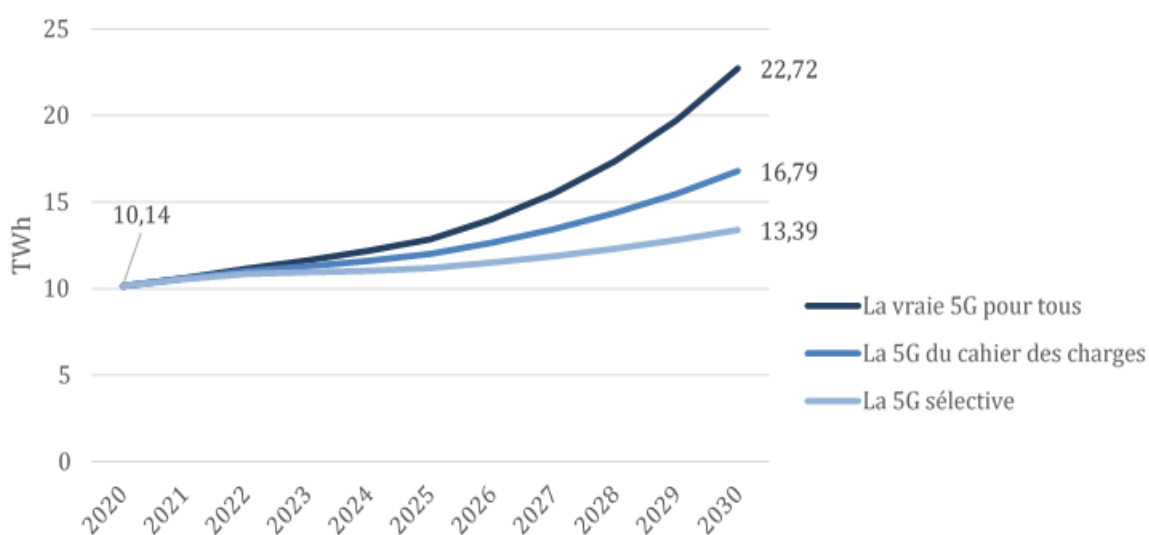
## 1.2. Les datacenters

En scénario de déploiement, la consommation d'énergie primaire des datacenters diffère surtout entre variantes à partir de 2025. Cette différence d'évolution s'explique par l'effet conjugué de différences de trafic plus marquées et d'une place plus grande prise par l'*edge computing*, si le maillage du réseau 5G couvre plus finement l'ensemble du territoire et accompagne l'internet des objets, par exemple pour la domotique, l'usine du futur et la voiture connectée puis autonome.



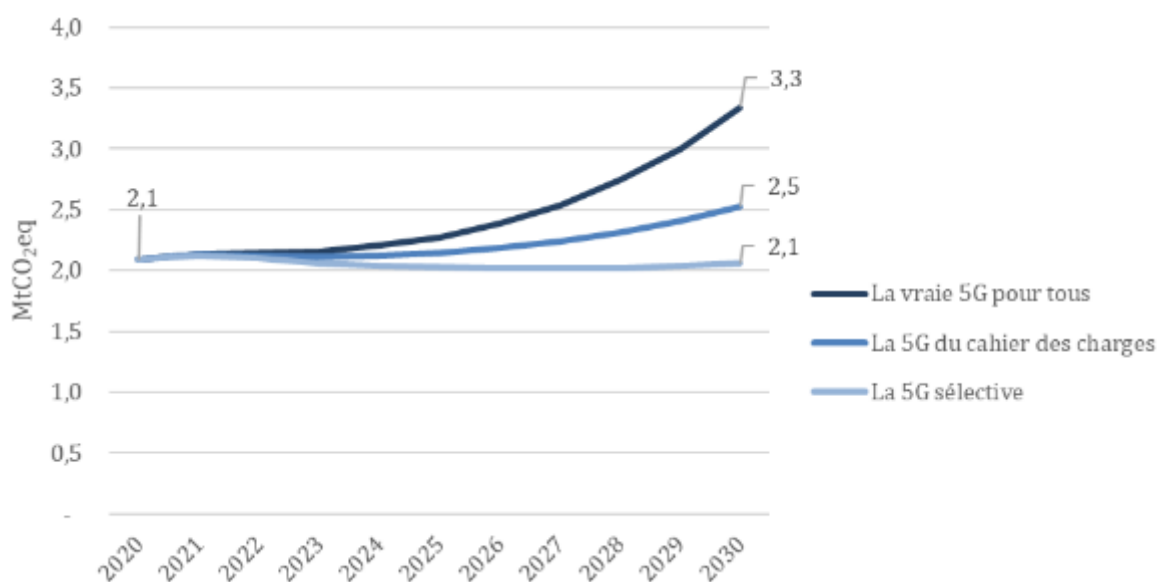
Graphique 8. Consommation d'énergie primaire des datacenters par variante du scénario de déploiement

Par construction, l'évolution de la consommation d'énergie primaire suit largement celle de l'électricité en utilisation. Cependant, la différence est plus marquée concernant les datacenters que les réseaux, car les hyperdatacenters à l'étranger consomment une quantité d'électricité non-négligeable, estimée à 1,3 TWh en 2020, par rapport à la consommation purement domestique représentée dans le graphique ci-dessous.



Graphique 9. Consommation d'électricité en France des datacenters par variante du scénario de déploiement

Même en cas de déploiement de la 5G et de hausse importante du trafic de données à traiter et stocker, les émissions de gaz à effet de serre associées aux datacenters qui servent le marché français pourraient rester stables, voire légèrement diminuer. Ce résultat présenté dans le graphique ci-dessous ne concerne que la variante « La 5G sélective ». Il s'explique avant tout par l'hypothèse d'une tendance vers *l'edge computing* qui serait largement dépassée par la tendance inverse de centralisation du stockage et du traitement de données, dans des hyperdatacenters désormais de plus en plus sur le territoire national. Ceux-ci sont à la fois plus efficaces que les datacenters classiques et consomment une électricité moins carbonée qu'à l'étranger.

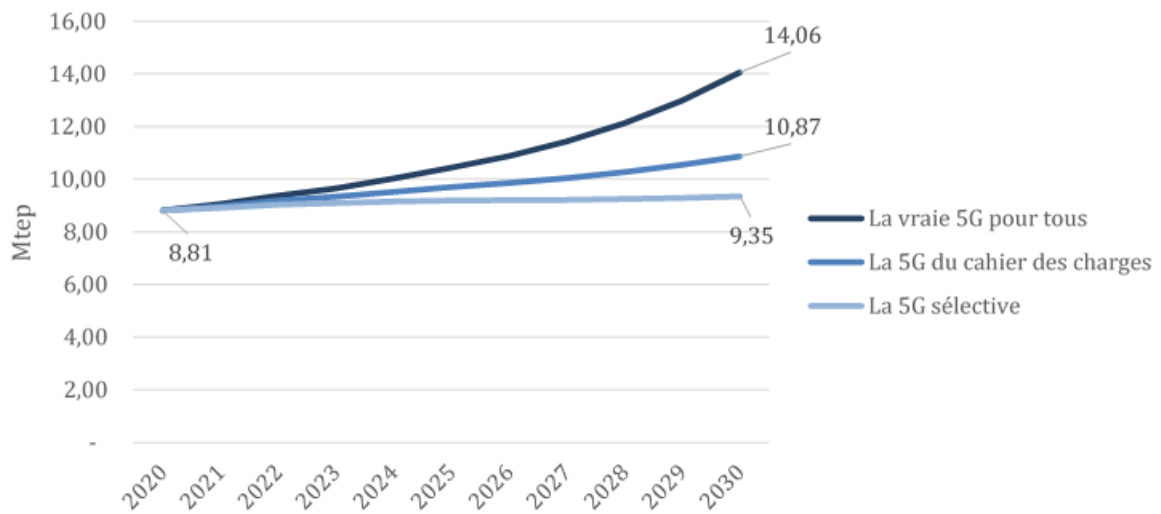


Graphique 10. Emissions de gaz à effet de serre des datacenters par variante du scénario de déploiement

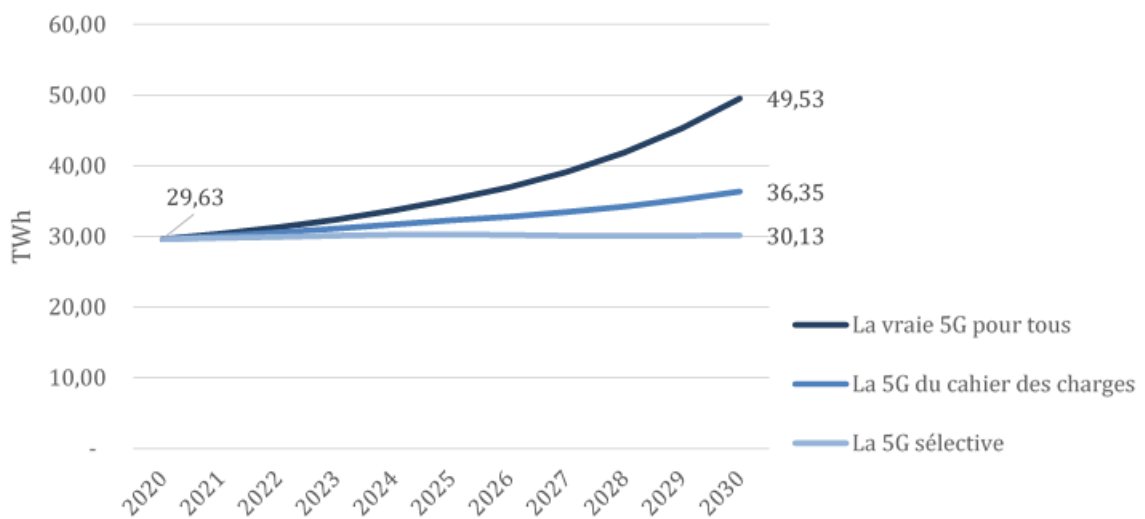
Les émissions cumulées des datacenters sur la période 2021 à 2030 s'élèveraient à 24,9 MtCO<sub>2</sub>eq en déploiement de « La vraie 5G pour tous », 22,3 MtCO<sub>2</sub>eq pour « La 5G du cahier des charges » et 20,5 MtCO<sub>2</sub>eq pour « La 5G sélective ».

### 1.3. Les terminaux

Comme on peut l'observer plus bas, dans la « 5G sélective », c'est-à-dire lorsque les hypothèses sur les 5 terminaux émergents sont les plus conservatrices, les gains d'efficacité énergétique de nombreux terminaux matures pourraient suffire à compenser les hausses de consommation d'énergie primaire sur tout le cycle de vie (cf. Graphique 11) et d'électricité en phase utilisation (cf. Graphique 12) des terminaux émergents, comme les objets connectés. Le degré de pénétration de ces derniers sur le marché français est clef.

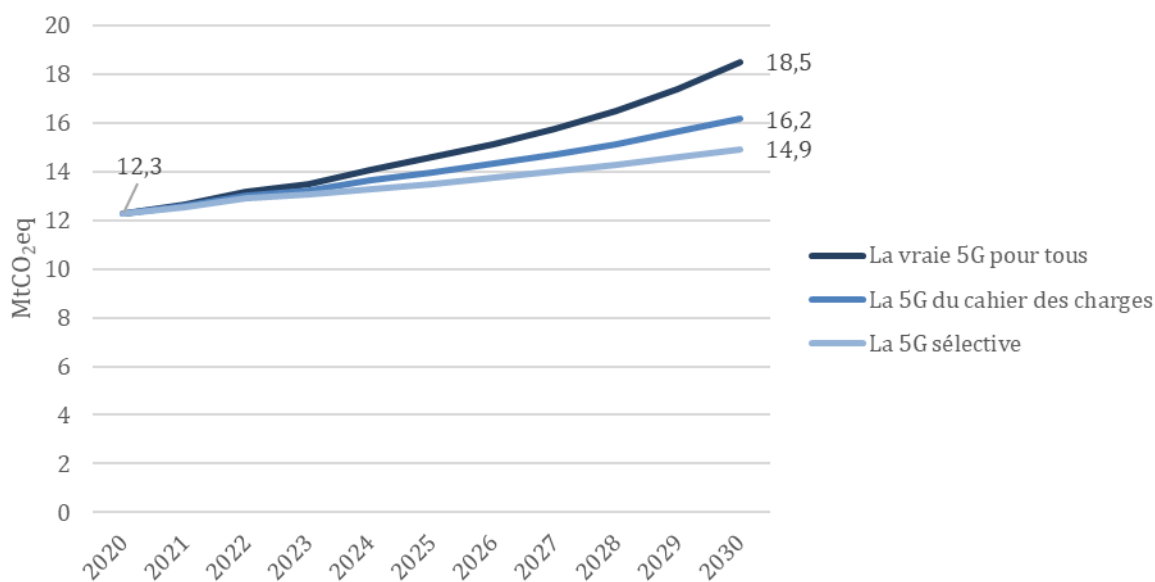


Graphique 11. Consommation d'énergie primaire des terminaux par variante du scénario de déploiement



Graphique 12. Consommation d'électricité en France des terminaux par variante du scénario de déploiement

Toutes ces projections pointent vers une augmentation de l'empreinte carbone des terminaux en France en cas de déploiement de la 5G (cf. Graphique 13).



Graphique 13. Emissions de gaz à effet de serre des terminaux par variante du scénario de déploiement

#### 1.4. Synthèse du scénario de déploiement

En scénario de déploiement, la consommation d'énergie primaire par le secteur du numérique en France devrait augmenter entre 2020 et 2030, passant de 13 Mtep (151 TWh) à entre 15 et 24 Mtep (177 et 278 TWh) (cf. Tableau 15) selon l'évolution de paramètres exogènes mais aussi et surtout de choix sur l'architecture du réseau mobile 5G. Le constat est proche concernant l'évolution de l'empreinte carbone du secteur, qui devrait passer de 15 MtCO<sub>2</sub>eq à entre 18 et 24 MtCO<sub>2</sub>eq.

	Energie primaire (Mtep)				Emissions de GES (MtCO <sub>2</sub> eq)			
	2020	2030			2020	2030		
	Toutes	La vraie 5G pour tous	La 5G du cahier des charges	La 5G sélective	Toutes	La vraie 5G pour tous	La 5G du cahier des charges	La 5G sélective
<b>Réseaux</b>	1,14	3,88	3,25	2,32	0,77	1,88	1,60	1,19
<b>Datacenters</b>	2,86	5,89	4,38	3,52	2,09	3,34	2,52	2,06
<b>Terminaux</b>	8,01	14,06	10,87	9,35	12,30	18,51	16,17	14,93
<b>Total</b>	<b>12,81</b>	<b>23,83</b>	<b>18,51</b>	<b>15,18</b>	<b>15,16</b>	<b>23,73</b>	<b>20,29</b>	<b>18,18</b>

Tableau 15. Synthèse des consommations d'énergie primaire et d'émissions de gaz à effet de serre par sous-ensemble et par variante du scénario de déploiement

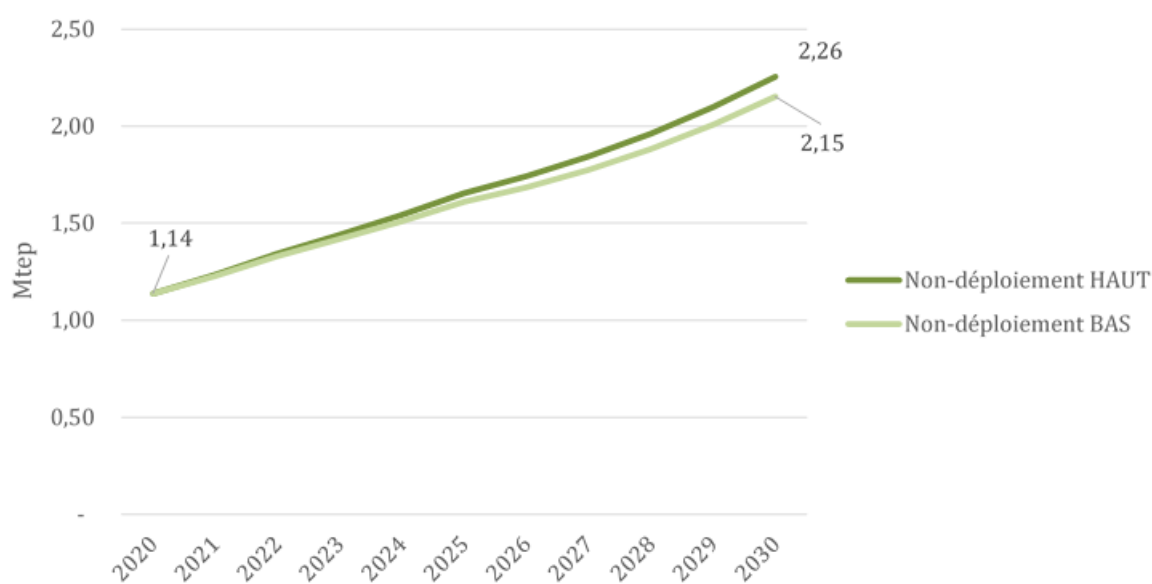
Tableau 1



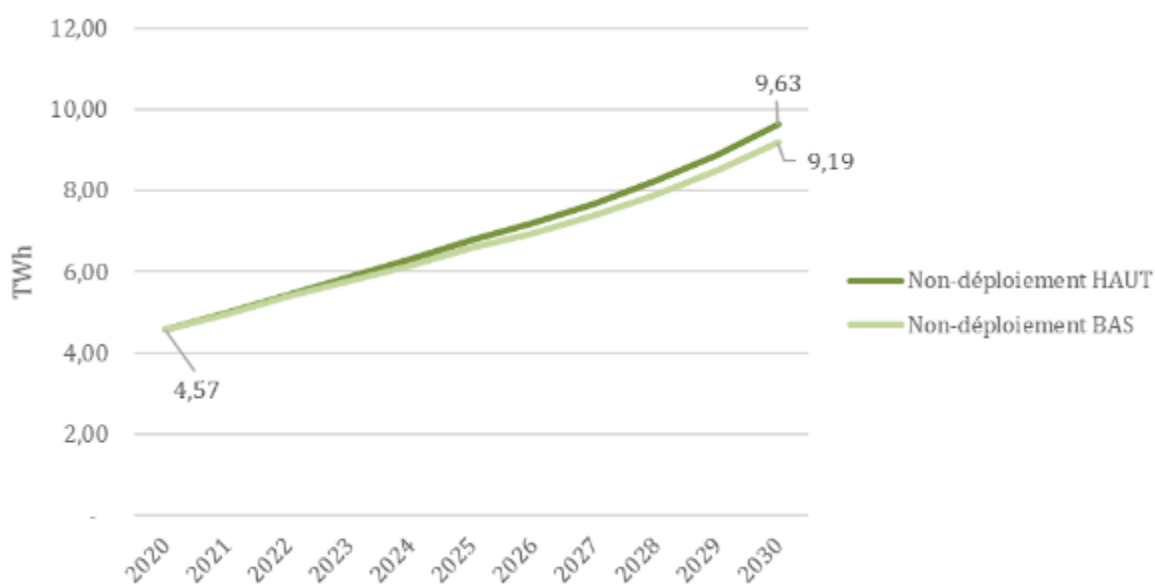
## 2. Scénario de non-déploiement

### 2.1. Les réseaux

En scénario de non-déploiement, les consommations d'énergie des réseaux diffèrent entre variantes seulement concernant la consommation d'électricité du réseau mobile 4G et l'énergie primaire amont associée. Dans tous les cas, la poursuite du déploiement de la 4G, à la fois par la mise en service de nouveaux sites et par l'augmentation des capacités des sites-opérateurs 4G existants vers la 4G+ (multi-bandes de fréquences), ferait croître légèrement la consommation d'électricité des réseaux (cf. Graphique 15), dont dépend très largement (à plus de 80%) l'évolution de la consommation d'énergie primaire (cf. Graphique 14).

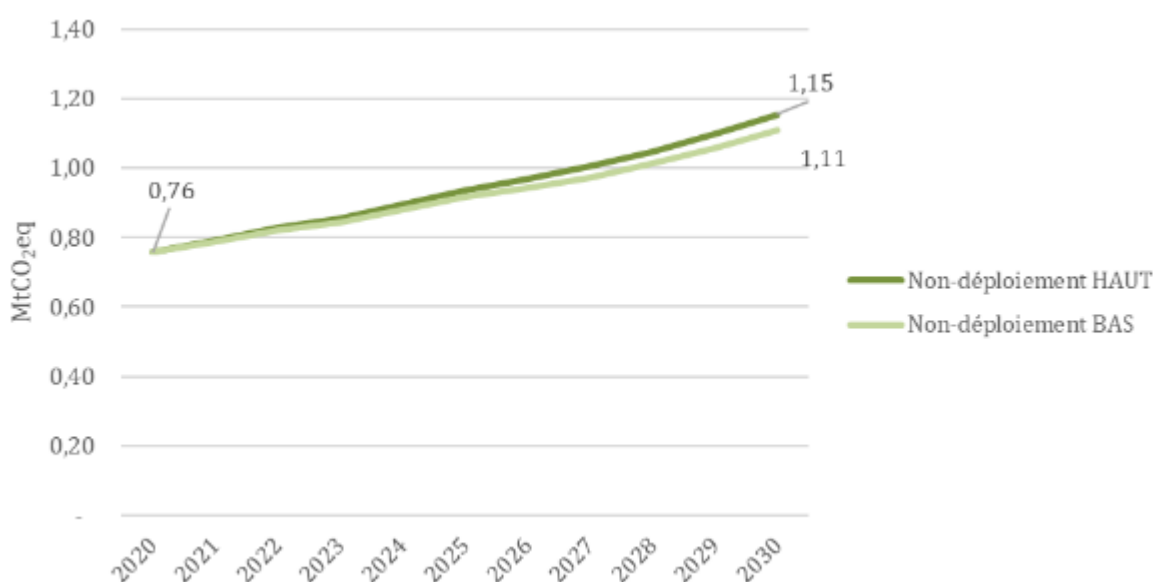


Graphique 14. Consommation d'énergie primaire des réseaux par variante du scénario de non-déploiement



Graphique 15. Consommation d'électricité en France des réseaux par variante du scénario de non-déploiement

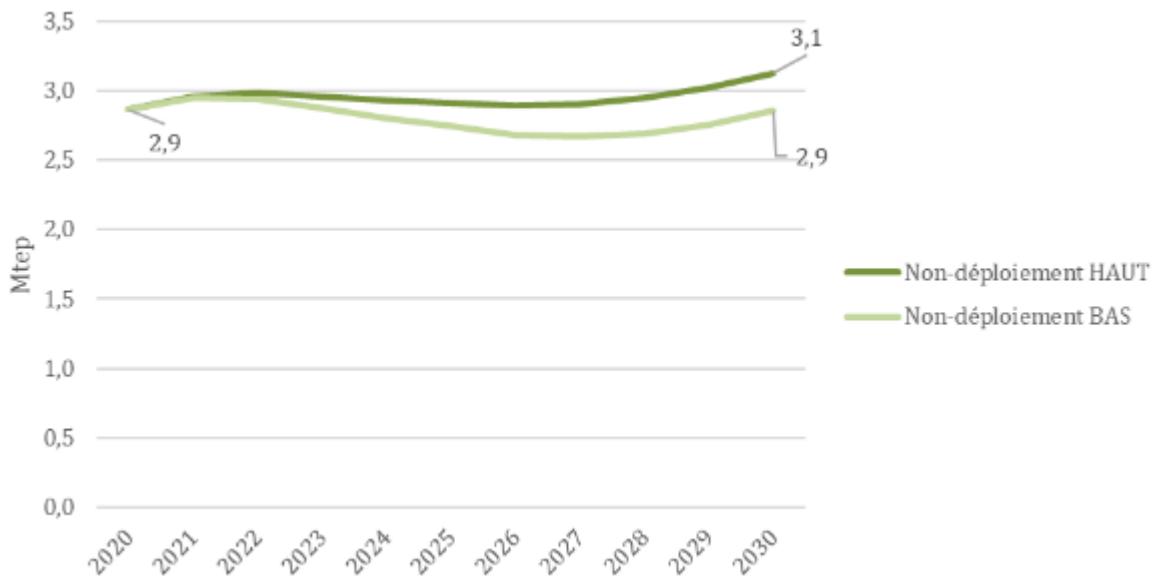
Par construction et du fait d'une réduction du facteur d'émission en utilisation (cf. 4.1) plus rapide que le facteur d'émission amont (cf. 4.3) selon nos hypothèses, les émissions de gaz à effet de serre liées à la consommation d'électricité des réseaux en France devraient rester stables, tandis que les émissions liées aux achats d'équipements et à la construction des infrastructures des réseaux (amont) devraient croître modérément (+1% à +6% par an) et dépasser les premières. Au total, l'empreinte carbone des réseaux de télécommunications en France devrait légèrement augmenter les dix prochaines années en cas de non-déploiement de la 5G (cf. Graphique 16), mais une trajectoire de stabilité se situe dans la marge d'erreur du modèle. Une réduction de l'empreinte carbone des réseaux apparaît possible en deuxième moitié de décennie.



Graphique 16. Emissions de gaz à effet de serre des réseaux par variante du scénario de non-déploiement

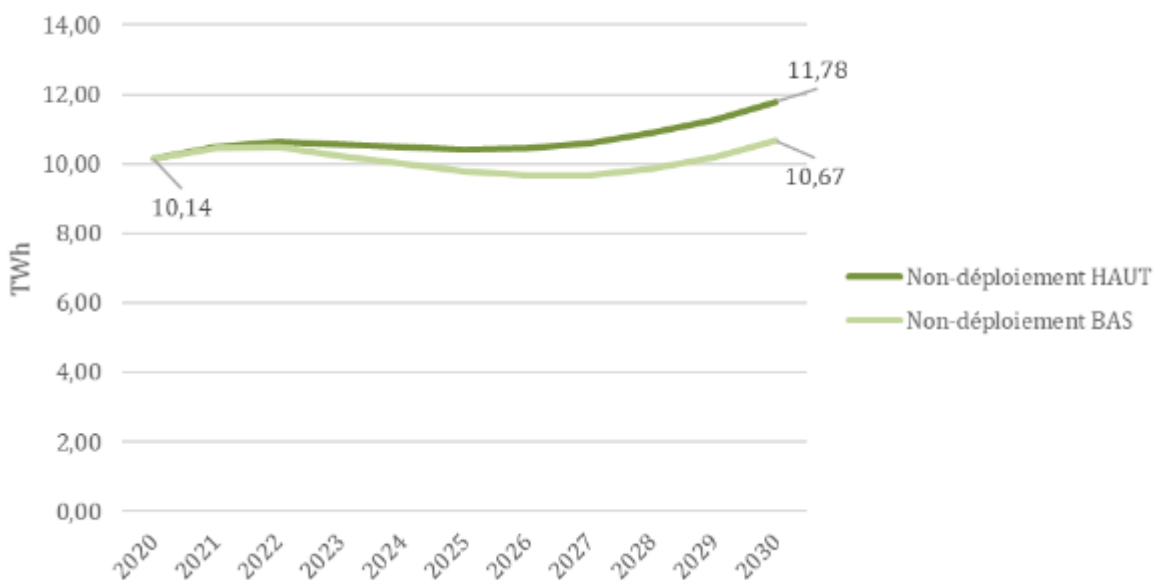
## 2.2. Les datacenters

En scénario de non-déploiement, la consommation d'énergie primaire des datacenters diffère surtout entre variantes à partir de 2023, essentiellement sous l'effet de différences de trafic. Les types de datacenters par lesquels le trafic français transite varient peu selon nos hypothèses. La mise en service et la montée en charge des hyperdatacenters situés en France se feraient rapidement pour atteindre plus de 30% du trafic en 2030. C'est à cette condition, synonyme de gains d'efficacité importants, que les projections pointent vers une stabilisation voire une baisse de la consommation d'énergie à moyen terme. A plus long terme, la consommation d'énergie des datacenters pourrait augmenter à nouveau (cf. Graphique 17) à cause notamment d'un ralentissement des gains d'efficacité énergétique dans les hyperdatacenters en France puisqu'ils seront montés en charge et auront atteint les mêmes limites d'efficacité que les hyperdatacenters à l'étranger.



Graphique 17. Consommation d'énergie primaire des datacenters par variante du scénario de non-déploiement

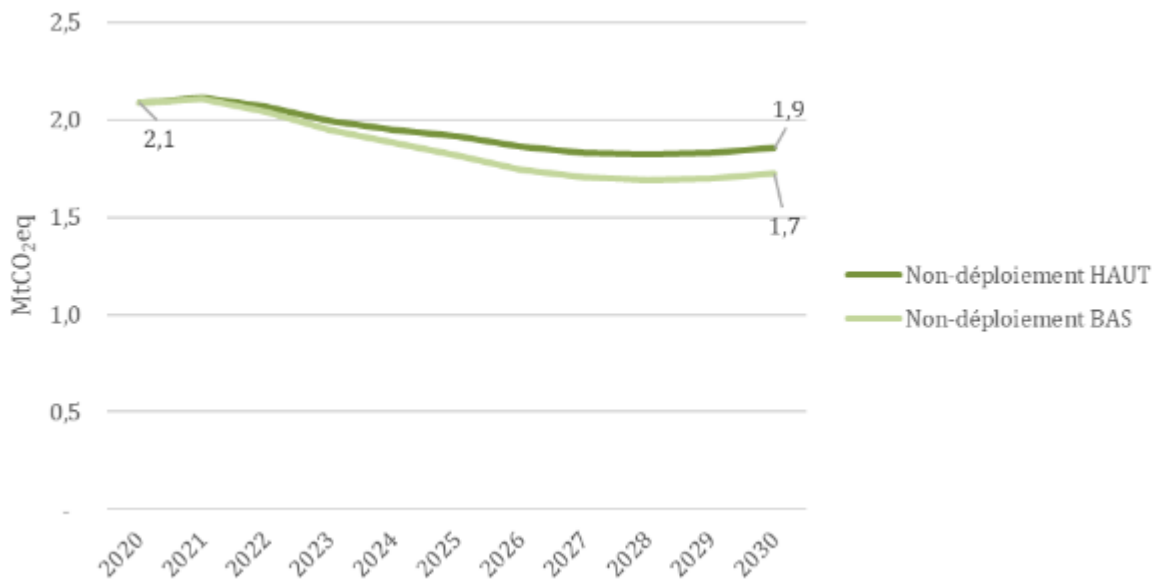
La consommation électrique en utilisation des datacenters situés en France est le principal déterminant de la consommation d'énergie totale présentée ci-dessus. Que la 5G soit déployée ou non sur le territoire, le postulat est que le stockage et traitement pour les services numériques en France devrait tendre vers une « relocalisation ». Aussi, la consommation domestique d'électricité par des datacenters devrait croître dans la prochaine décennie (cf. Graphique 18) ; et cela même en cas de non-déploiement de la 5G et de ralentissement de la croissance du trafic.



Graphique 18. Consommation d'électricité en France des datacenters par variante du scénario de non-déploiement

Dans le même temps, la modélisation réalisée dans cette étude pour le scénario de non-déploiement pointe vers une légère réduction des émissions de gaz à effet de serre liées au cycle de vie des datacenters mobilisés pour les usages français du numérique. Cette baisse modérée (cf. Graphique 19) est conditionnée par une relocalisation des datacenters (en

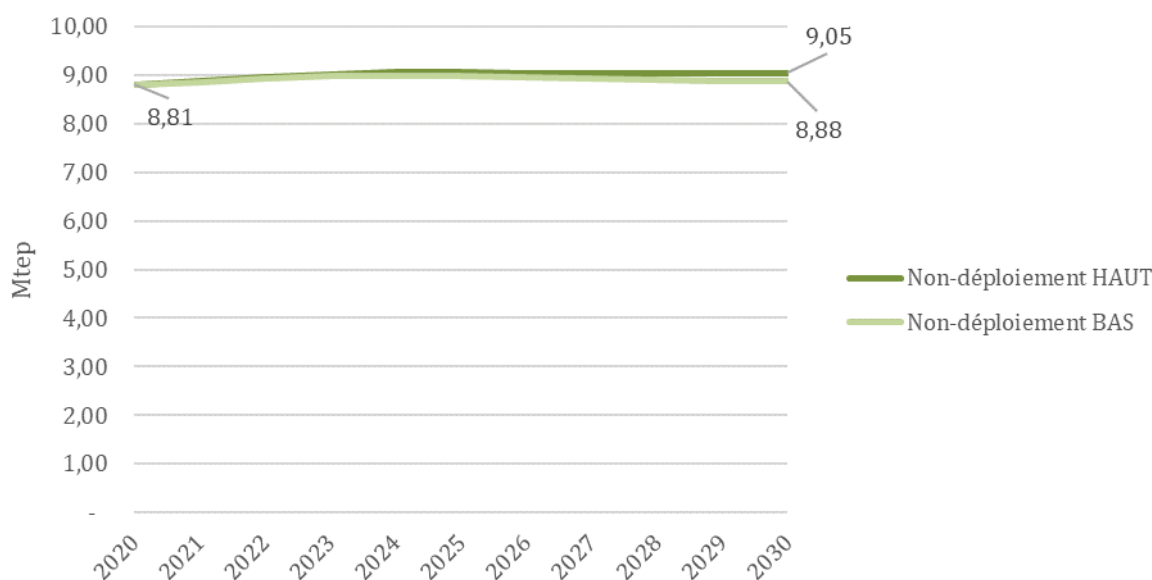
particulier grâce à la mise en service d’hyperdatacenters sur le territoire), par l’absence d’effet rebond significatif sur le trafic (du fait du non-déploiement), et par la poursuite de la décarbonation du système électrique français.



Graphique 19. Emissions de gaz à effet de serre des datacenters par variante du scénario de non-déploiement

### 2.3. Les terminaux

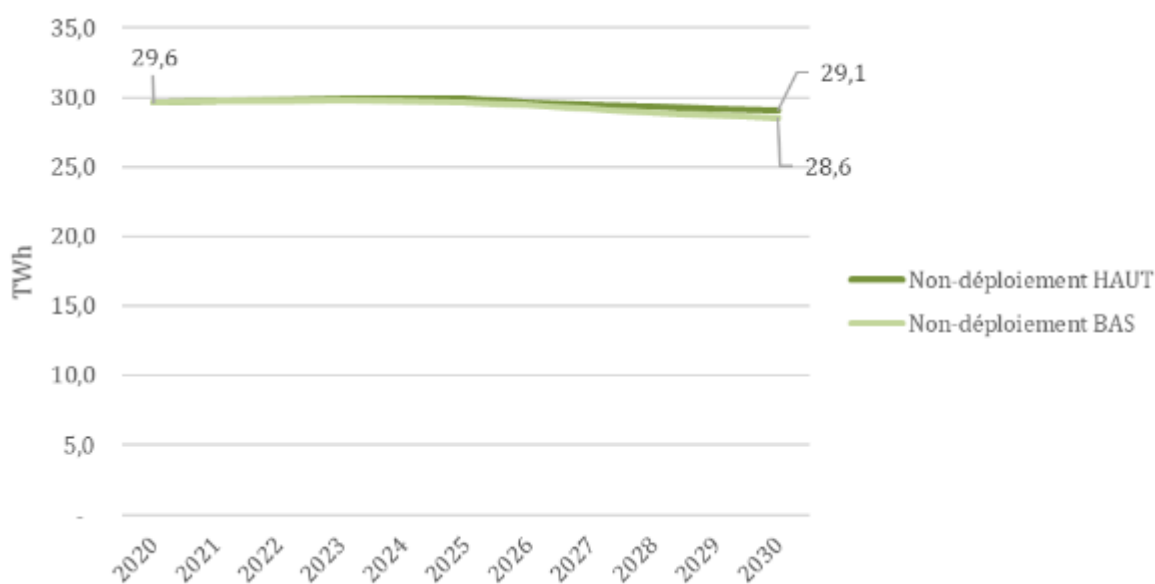
En cas de non-déploiement, l’évolution de la consommation énergétique sur l’ensemble du cycle de vie des terminaux des Français est incertaine. La présente étude pointe vers une légère hausse de cet indicateur en énergie primaire (cf. Graphique 20) portée par la phase amont, c’est-à-dire par la hausse du volume de ventes des terminaux émergents et par l’augmentation de la taille et de la résolution des écrans (Smartphones, écrans publicitaires, etc.).



Graphique 20. Consommation d'énergie primaire des terminaux par variante du scénario de non-déploiement

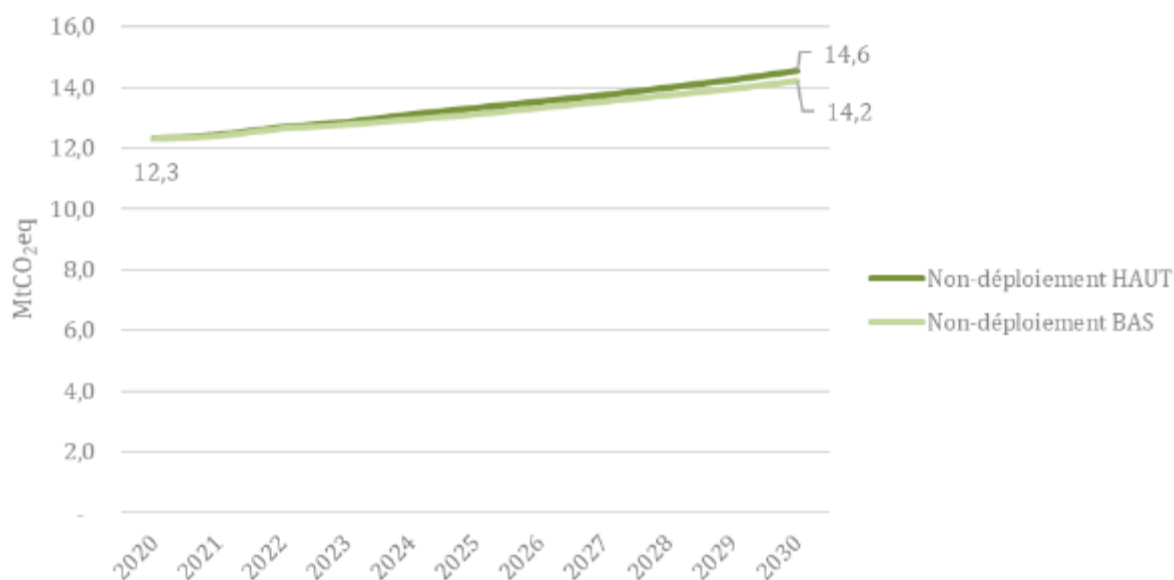
Alors que la phase amont ne représenterait qu'un quart de la consommation d'énergie sur l'ensemble du cycle de vie des 11 terminaux présumés non-affectés par le déploiement de la 5G, les proportions s'inversent avec environ les trois quarts de la consommation d'énergie pour la phase amont des terminaux mobiles émergents : Smartphones, montres et bracelets connectés, casques VR et lunettes AR. Par définition, la phase utilisation est majoritaire en ce qui concerne les modules de connexion IoT et IIoT. Cette inversion contribue à expliquer la décorrélation progressive que l'on observe entre l'évolution de l'énergie primaire présentée ci-dessus, et celle de l'électricité en utilisation ci-dessous.

Comme présenté dans « Hypothèses sur les terminaux », un certain nombre de terminaux matures et aujourd'hui consommateurs d'énergie en fonctionnement (téléviseurs, box, ordinateurs, etc.) devraient voir leur consommation électrique baisser, que la 5G soit déployée ou non. C'est à cette condition et à celle d'une adoption des objets connectés bien plus faible qu'anticipée dans la littérature prospective du secteur (GSMA, Juniper Research, McKinsey, etc.) que la consommation d'électricité des terminaux en France pourrait diminuer progressivement, à partir de 2025 environ (cf. Graphique 21).



*Graphique 21. Consommation d'électricité en France des terminaux par variante du scénario de non-déploiement*

La croissance des dépenses énergétiques pour produire les terminaux (par unité et par un effet de structure), plutôt que pour les faire fonctionner, explique aussi l'évolution projetée cette fois à la hausse de l'empreinte carbone des terminaux en France, même sans le déploiement de la 5G (cf. Graphique 22). Le facteur d'émission est toujours plus élevé en phase amont qu'en phase utilisation dans ce secteur. Ce résultat semble relativement certain puisque les hypothèses conservatrices posées dans le scénario contrefactuel ne suffisent pas à inverser la tendance quant à l'empreinte carbone des terminaux. De plus, les terminaux sont responsables de la majeure partie de l'empreinte carbone du numérique en France, comme cela est détaillé dans le chapitre suivant.



Graphique 22. Emissions de gaz à effet de serre des terminaux par variante du scénario de non-déploiement

#### 2.4. Synthèse du scénario de non-déploiement

En scénario de non-déploiement, la consommation d'énergie primaire par le secteur du numérique en France devrait augmenter légèrement entre 2020 et 2030, passant de 13 Mtep (151 TWh) à environ 14 Mtep (163 TWh) (cf. Tableau 17). Le constat est proche concernant l'évolution de l'empreinte carbone du secteur, qui devrait passer de 15 MtCO<sub>2</sub>eq à environ 17 MtCO<sub>2</sub>eq.

	Energie primaire (Mtep)			Emissions de GES (MtCO <sub>2</sub> eq)		
	2020	2030		2020	2030	
Variante	Toutes	Haute	Basse	Toutes	Haute	Basse
Réseaux	1,14	2,26	2,15	0,77	1,16	1,12
Datacenters	2,86	3,12	2,85	2,09	1,86	1,72
Terminaux	8,81	9,05	8,88	12,30	14,56	14,21
<b>Total</b>	<b>12,81</b>	<b>14,43</b>	<b>13,88</b>	<b>15,16</b>	<b>17,58</b>	<b>17,05</b>

Tableau 17. Synthèse des consommations d'énergie primaire et d'émissions de gaz à effet de serre par sous-ensemble et par variante du scénario de non-déploiement

# **Chapitre 5 : Comparaisons entre le déploiement et le non-déploiement de la 5G et mises en perspective**

Dans le chapitre précédent, les résultats ont été présentés par scénario, de manière à comparer leurs variantes respectives séparément. Dans ce chapitre, les évolutions des 3 variantes de déploiement et des 2 variantes de non-déploiement sont représentées dans des mêmes graphiques afin de pouvoir opérer des comparaisons en différentiel. Nous verrons tout d'abord les résultats pour la consommation d'énergie primaire, puis ceux de la consommation d'électricité en France et enfin ceux des émissions de gaz à effet de serre.

Les résultats présentés ci-dessous concernent uniquement les usages directs du numérique. Les usages indirects ne font pas partie du périmètre et n'ont donc pas été estimés (cf. Réseaux et usages numériques).

A noter que, comme indiqué au 1.4 (Périmètre d'étude) du Chapitre 1, nous n'avons pas étudié ici l'impact du déploiement de la 5G sur d'autres critères environnementaux que la consommation d'énergie primaire et les émissions de gaz à effet de serre. A titre purement indicatif, il est probable que tout scénario induisant une augmentation significative du volume de terminaux produits aura un impact important sur l'épuisement de ressources non renouvelables telles que les métaux rares.

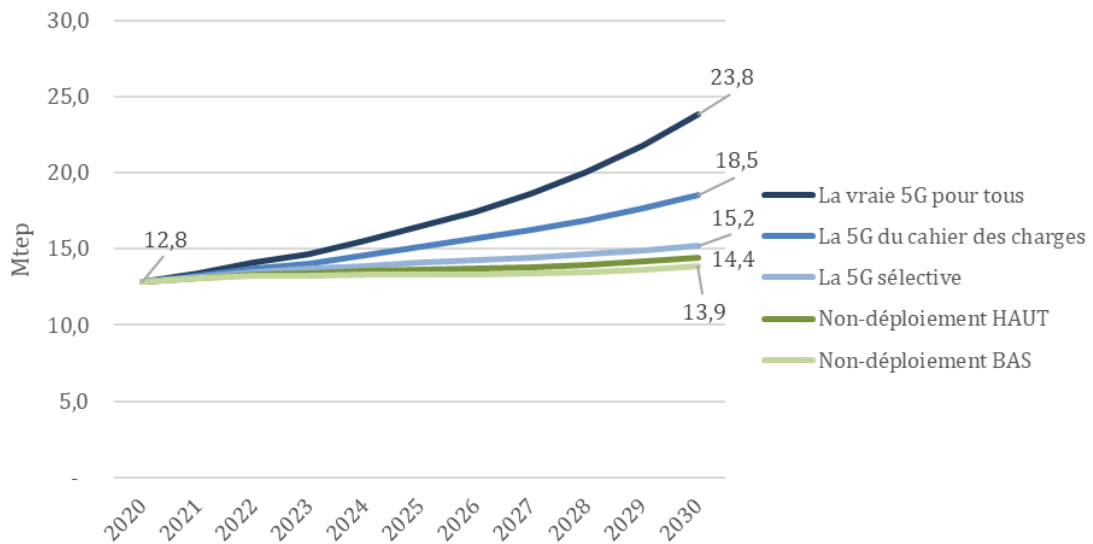
## 1. Comparaison de la consommation d'énergie primaire

La consommation d'énergie pour les usages français du numérique devrait croître dans la prochaine décennie, avec ou sans déploiement de la 5G. En d'autres termes, seul un scénario de sobriété avec des hypothèses plus fortes encore que dans la variante « Non-déploiement BAS » pourrait inverser la tendance. Il serait marqué par exemple par l'épuisement de l'innovation numérique, de la croissance du trafic de données et de la dynamique d'effets rebond en série. Les cinq trajectoires modélisées et discutées ci-après prévoient toutes la croissance des usages numériques et du trafic de données en France (cf. Graphique 1) ; mais à des rythmes contrastés.

Le scénario de déploiement tendanciel et encouragé par le régulateur, désigné comme « La 5G du cahier des charges », verrait la consommation d'énergie primaire du numérique en France passer de 12,8 Mtep (150 TWh) en 2020 à 18,5 Mtep (216 TWh) en 2030 (cf. Graphique 23). En cas de non-déploiement de la 5G, la consommation d'énergie primaire serait en croissance plus limitée et ne dépasserait pas 14,4 Mtep (168 TWh) en 2030 dans la variante « non-déploiement HAUT ». La mission estime le plus probable que le déploiement entraîne la consommation supplémentaire de ressources énergétiques primaires d'un peu plus de 4 Mtep (50 TWh) à horizon 2030.

A titre de comparaison, les ressources d'énergie primaire (toutes formes confondues, avant pertes en conversions, transport et exportations) mobilisées en France en 2018 s'établissaient à 261,8 Mtep (2940 TWh). Toutes choses égales et stables par ailleurs, le déploiement de la 5G augmenterait donc d'1,5% l'empreinte énergétique des Français.





Graphique 23. Consommation d'énergie primaire par variante

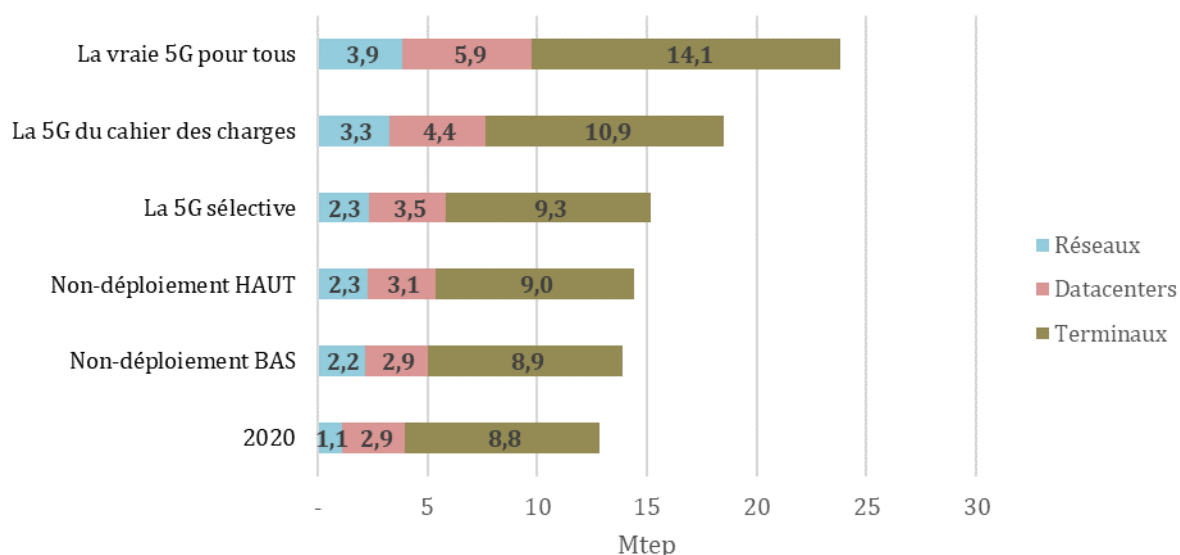
Si l'empreinte énergétique du numérique est prévue à la hausse dans tous les scénarios et variantes, la dispersion des résultats entre variantes du déploiement est frappante. Il convient de l'expliquer de manière désagrégée, par sous-ensemble du numérique (cf. Graphique 24).

Le sous-ensemble pour lequel l'augmentation est à la fois la plus grande en proportion et la plus certaine est les réseaux. Leur consommation d'énergie devrait être multipliée par deux même si l'on ne déployait pas la 5G. La variante « Non-déploiement HAUT » prévoit un ralentissement substantiel de la croissance du trafic mobile dans les prochaines années : de 43% en 2020 vers 25% en 2030. Dans le même temps, les gains d'efficacité énergétique atteints par la mise en service de nouvelles antennes 4G seraient moindres qu'en scénario de déploiement de sites 5G. « La 5G sélective » permettrait de maintenir une croissance du trafic mobile plus élevée (tendant vers 38% en 2030) sans pour autant provoquer d'augmentation significative de la consommation d'énergie des réseaux par rapport au non-déploiement. Cela est dû à un déploiement des sites-opérateurs 5G qui serait restreint aux zones très denses puis denses pour les « désengorger », et donc pour partie en substitution d'antennes 4G supplémentaires et moins efficaces. *A contrario*, le déploiement massif de la 5G en 3,5 GHz vers les territoires de densité intermédiaire (« La 5G du cahier des charges ») voire peu denses (« La vraie 5G pour tous ») provoquerait la multiplication par trois et quatre respectivement de la consommation d'énergie des réseaux en France, au lieu du doublement dans les autres variantes.

La hausse de la consommation d'énergie des datacenters est moins assurée. Elle est très probable en scénario de déploiement de la 5G, mais moins en non-déploiement grâce à la conjonction d'hypothèses conservatrices sur l'évolution du trafic de données et la mise en service d'hyperdatacenters très efficaces et dans la mouvance *cloud* sur le territoire français. Elle est en revanche tout aussi contrastée entre variantes que le sont les réseaux. Des éléments d'explication sont donnés dans la section suivante : « Comparaison de la consommation d'électricité en France ».

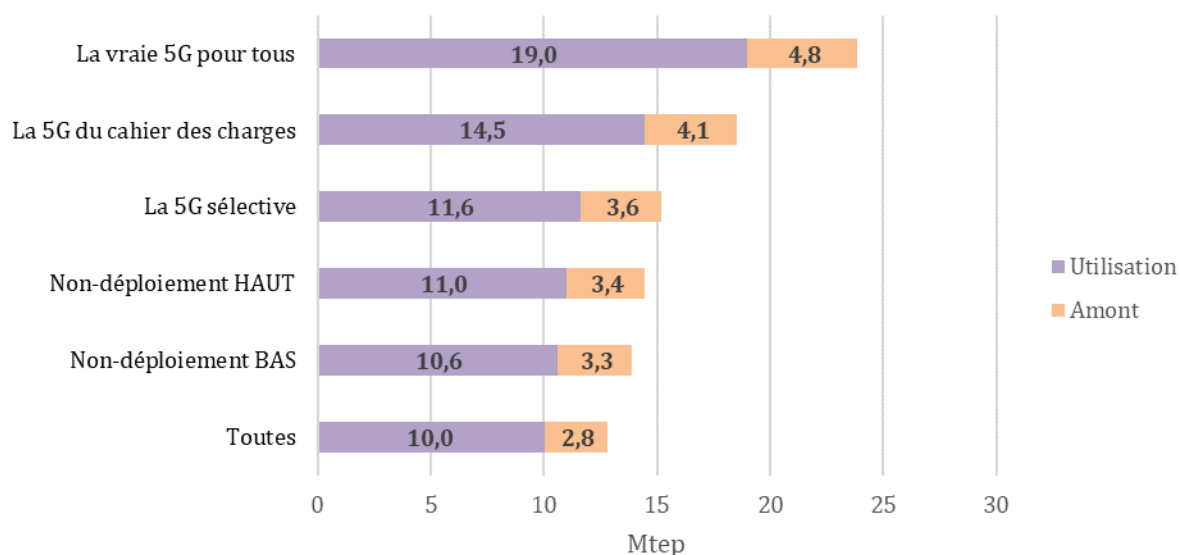
Enfin, l'impact du déploiement de la 5G sur l'empreinte énergétique des terminaux est à la fois le moins certain et le plus risqué. Les terminaux contribuent en effet aux deux tiers de la consommation d'énergie du numérique. Le développement de l'internet des objets forme le

principal facteur d'incertitude. Y-aura-t-il 10, 20 ou 50 objets et machines connectés par français en 2030, contre 5 aujourd'hui ? En d'autres termes, jusqu'à quel point le numérique va-t-il s'étendre ? Le modèle réalisé pour cette étude suppose que l'adoption de nouveaux terminaux (en particulier les machines et objets connectés) est fortement corrélée aux modalités de déploiement de la 5G. Même si l'on rejette ou réduit cette hypothèse, les projections contrastées permettent d'encadrer les incertitudes qui planent sur l'évolution de l'empreinte énergétique des terminaux. Alors qu'une baisse de l'empreinte énergétique des terminaux en France paraît peu probable en cas de déploiement de la 5G, une hausse jusque 60% est envisageable.



Graphique 24. Consommation d'énergie primaire par variante et par sous-ensemble en 2030 et 2020

Sur 12,8 Mtep (150 TWh) de consommation d'énergie primaire pour les usages numériques français en 2020, 10 Mtep (117 TWh) et 2,8 Mtep (33 TWh) sont consommées en phase utilisation et en phase amont respectivement, soit 78% et 22% (cf. Graphique 25). La phase utilisation est donc cruciale en matière de consommation d'énergie primaire. Quelle que soit la variante, ces parts sont relativement stables sur l'ensemble de la période étudiée. Par exemple, dans la variante « La vraie 5G pour tous » du scénario de déploiement la phase utilisation représente environ 80% et la phase amont environ 20% des 23,8 Mtep (278 TWh) consommés. La quantité importante d'énergie primaire consommée en phase utilisation est principalement due à l'électricité utilisée pour le fonctionnement des terminaux. Toutefois, comme évoqué dans la partie précédente, la consommation des réseaux et des datacenters progresse fortement, surtout dans le scénario de déploiement.



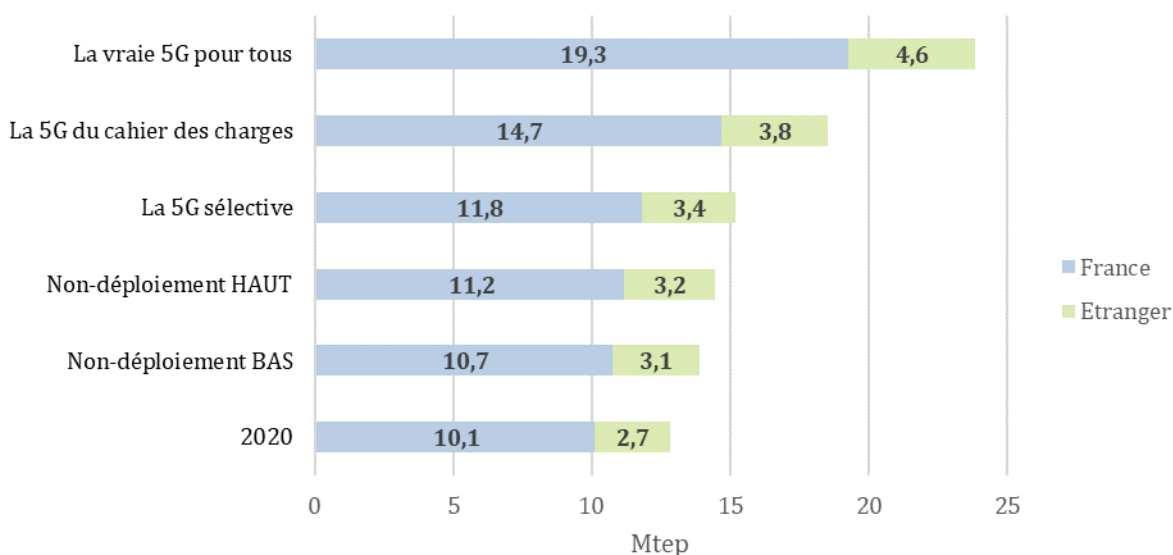
Graphique 25. Consommation d'énergie primaire par variante et par phase amont et utilisation en 2020 et 2030

Les usages numériques en France consomment de l'énergie sur le territoire national mais aussi à l'étranger. Les consommations d'énergie en France correspondent à peu près aux phases utilisations des terminaux, réseaux et datacenters (seulement ceux situés en France). Quant à elles, les phases amonts des trois sous-ensembles consomment surtout de l'énergie à l'étranger, puisque l'essentiel des équipements numériques y sont fabriqués, plus précisément en Asie du Sud-Est. La ventilation des consommations d'énergie entre la France et l'étranger présentée ci-dessous (cf. Graphique 26) est donc presque identique à celle entre les phases utilisation et amont présentée ci-dessus.

Cependant, la ventilation France-Etranger requiert d'émettre des hypothèses supplémentaires quant à la part de l'énergie primaire amont consommée en France. Il n'existe en effet pas de données publiques provenant des acteurs des réseaux et datacenters sur les énergies embarquées dans leurs équipements et infrastructures. L'étude retient par défaut 33% pour les réseaux et datacenters, et 10% pour les terminaux avec de grandes marges d'incertitudes.

Enfin, la ventilation par sous-ensemble au sein des consommations d'énergie en France et à l'étranger diffère peu de la ventilation par sous-ensemble quel que soit le lieu de consommation d'énergie, telle que présentée précédemment (cf. Graphique 24). Les réseaux et datacenters occupent évidemment une part plus importante des consommations d'énergie en France qu'à l'étranger, et cette part croît dans le temps, plus ou moins vite selon les scénarios de déploiement.

En somme, la hausse des consommations d'énergie du secteur numérique à horizon 2030, plus ou moins marquée selon les scénarios, est générale : elle concerne la phase amont comme la phase utilisation, la France comme l'étranger.



Graphique 26. Consommation d'énergie primaire en France et à l'étranger en 2020 et par variante en 2030

## 2. Comparaison de la consommation d'électricité en France

La consommation d'électricité en France pour les usages numériques des Français représenterait aujourd'hui environ 44,3 TWh, soit près de 10% de la consommation française totale d'électricité. Cette estimation est conforme à la mesure de Rte<sup>49</sup>.

Nos projections pointent toutes vers un accroissement de cette consommation électrique, y compris selon les variantes du contrefactuel, donc sans la 5G et avec une réduction très significative de la croissance des usages par rapport à la tendance historique récente. En cas de déploiement de la 5G, la hausse serait comprise entre 9,1 TWh (variante « la 5G sélective ») et 44,5 TWh (variante « La vraie 5G pour tous »), par rapport à 2020 (cf. Graphique 27). Cet écart important reflète la nuance de 5G envisagée, avec notamment un développement des usages plus ou moins important. En cas de non-déploiement, la hausse serait de 4,1 à 6,2 TWh par rapport à 2020.

Ces chiffres méritent d'être mis en perspective de la production nationale d'électricité et de la trajectoire qui lui est assignée. En France, le nucléaire a produit 70,6% de l'électricité consommée en 2019. A cette période, il y avait 58 réacteurs en service en France, dont 34 de 900 MW<sup>50</sup>. En 2020, la centrale de Fessenheim et ses deux réacteurs 900 MW ont été définitivement fermés.

Les 16,5 TWh supplémentaires que requiert la variante « La 5G du cahier des charges » par rapport à la variante « non-déploiement BAS » en 2030 correspondent à la production annuelle moyenne d'environ 3 réacteurs nucléaires de 900 MW chacun<sup>51</sup>, et à la consommation d'électricité domestique d'1,1 millions de foyers français<sup>52</sup>.

Les projections de consommation d'électricité envisagées dans la récente Programmation Pluriannuelle de l'Energie ne prévoient pas de hausse de la consommation du secteur du numérique à horizon 2030. Les hypothèses faites tendent même vers une diminution

<sup>49</sup> « [La part du numérique dans la consommation électrique des français](#) » Rte (décembre 2019)

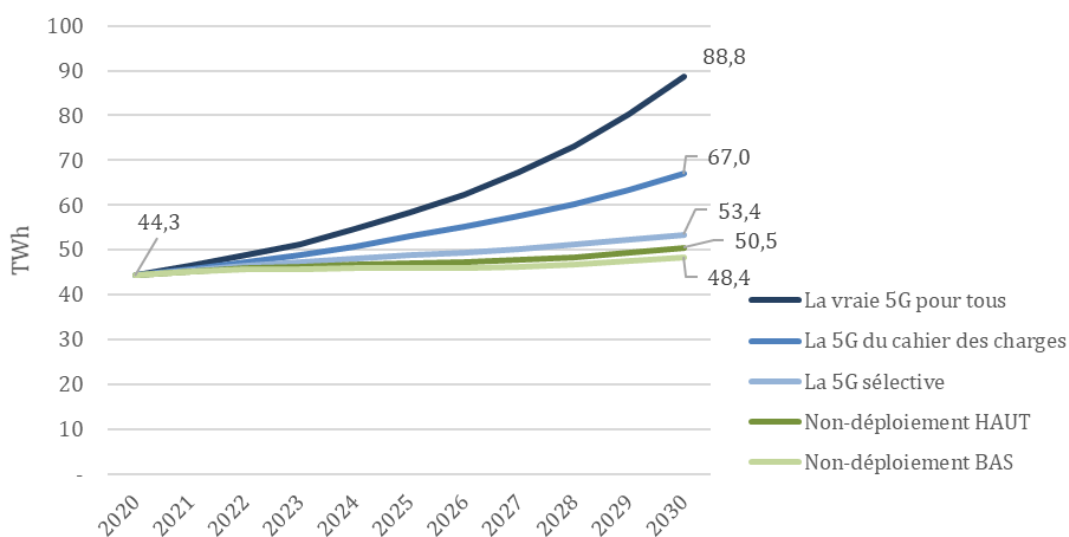
<sup>50</sup> « [Bilan électrique 2019](#) », RTE (2020)

<sup>51</sup> Parmi les 56 réacteurs nucléaires en activité, 32 ont une puissance 900MW

<sup>52</sup> « [Le nucléaire en chiffres](#) », EDF

d'environ 20% de la consommation du secteur, soit vers 35,4 TWh en 2030. Un rapport du CGE relève déjà cette probable erreur dans les termes suivants : « Cette projection concernant l'informatique est en contradiction avec l'ensemble des études plus récentes »<sup>53</sup>. L'écart avec la variante « La 5G du cahier des charges » serait alors d'environ 31,6 TWh, équivalent à la production électrique annuelle moyenne de plus de 5 réacteurs nucléaires de 900 MWh.

Pour répondre à cette hausse imprévue, l'électricité devrait être importée de pays étrangers ou nécessiterait la construction de nouvelles installations et infrastructures de production électrique.



Graphique 27. Consommation d'électricité en France par variante

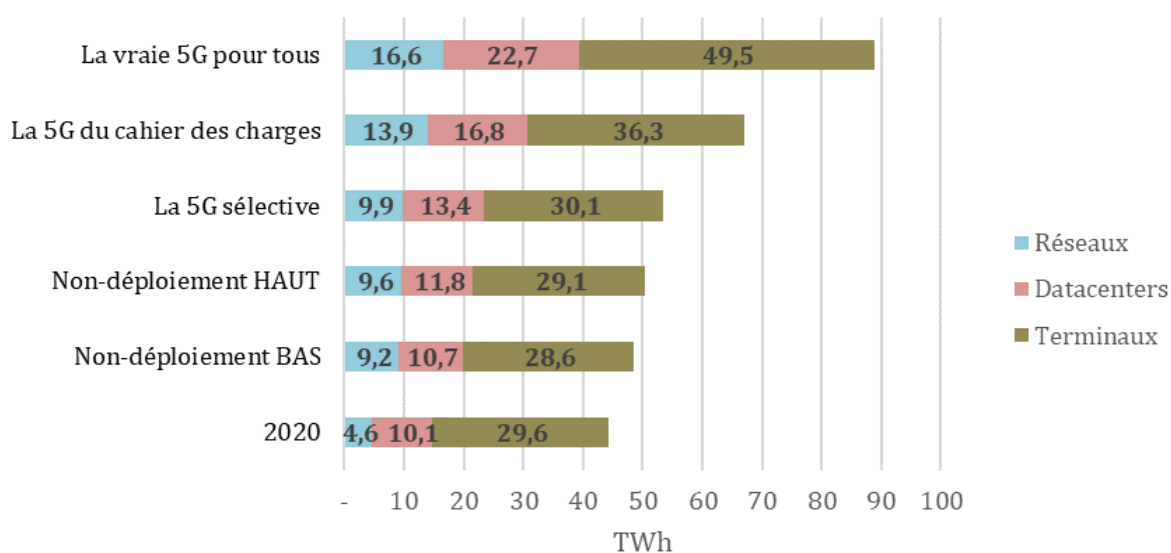
Quelle que soit la variante, les terminaux consomment plus de 55% de l'électricité totale. Toutefois, dans les deux variantes de non-déploiement, leur consommation diminuerait par rapport aux 29,6 TWh consommés en 2020. Dans la variante « non-déploiement BAS », la baisse serait d'environ 1 TWh et dans la variante « non-déploiement HAUT », elle serait d'environ 0,5 TWh (cf. Graphique 28). Dans le scénario de déploiement, la consommation électrique des terminaux augmenterait de 0,5 TWh à 19,9 TWh par rapport à 2020. Cet écart reflète l'adoption différenciée entre variante des terminaux émergents. Davantage d'explications sont fournies ci-dessous avec le commentaire du Graphique 29.

La diminution de la consommation d'électricité des terminaux observée dans le scénario de non-déploiement ne suffirait pas à réduire la consommation totale du secteur du numérique. En effet, la poursuite du déploiement de la 4G, à la fois par la mise en service de nouveaux sites et par l'augmentation des capacités des sites-opérateurs 4G existants vers la 4G+ (multi-bandes de fréquences), ferait croître la consommation d'électricité des réseaux. *A minima*, elle doublerait et *a maxima* elle serait multipliée par 2,1 par rapport à 2020. Dans les variantes du scénario de déploiement, la consommation électrique serait fortement croissante. En cas de déploiement limité de la 5G, c'est-à-dire dans la variante « La 5G sélective », la différence avec la variante haute du non-déploiement ne serait que de 0,3 TWh en 2030. Toutefois, en cas de déploiement massif de la 5G, la consommation électrique des réseaux serait multipliée par 3,6, soit une hausse d'environ 12 TWh. Le différentiel observé au sein du scénario de déploiement s'explique notamment par le maillage. En effet, dans la variante « La vraie 5G pour tous », 271 104 sites-opérateurs seraient déployés en 2030, alors

<sup>53</sup> « [Flexibilité du système électrique : contribution du pilotage de la demande des bâtiments et des véhicules électriques](#) », Conseil Général de l'Economie (mai 2020), page 49

que 66 763 sites-opérateurs seraient déployés dans la variante « la 5G sélective », toutes bandes de fréquence confondues (cf. Maillage).

La consommation électrique des datacenters sur le territoire national devrait quant à elle croître de manière relativement distincte selon les types de datacenters qui seront mis en service en France et selon le niveau de substitution (en proportion de trafic) qu'ils auront face aux datacenters à l'étranger. Dans tous les cas, les gains d'efficacité énergétique ne devraient pas dépasser le rythme de croissance du trafic de données (réseaux fixes et mobiles confondus), supérieur à 20% par an. De plus, la tendance est déjà à la hausse avec une croissance de la consommation d'électricité des datacenters de plus de 10% par an à l'échelle mondiale (The Shift Project, 2019) et de 3 à 6% par an en Allemagne les 5 dernières années. En comparaison, les projections de la présente étude sont conservatrices.

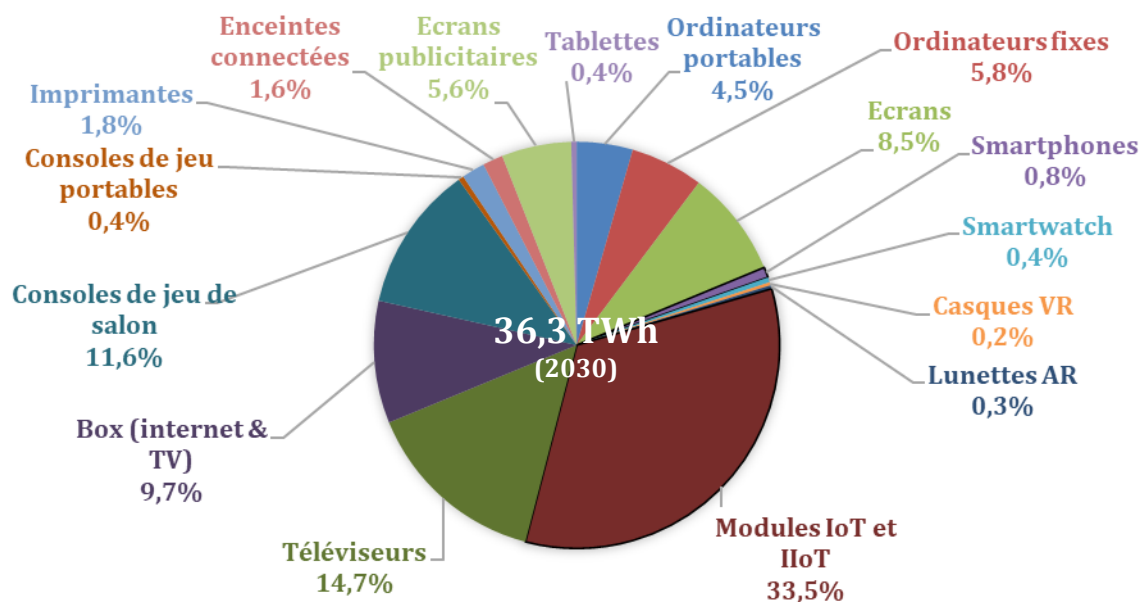


Graphique 28. Consommation d'électricité en France par variante et par sous-ensemble en 2030 et 2020

Les trajectoires des 5 catégories de terminaux les plus émergents et impactés par la 5G expliquent les différences entre variantes dans les graphiques précédents. De nouveau, la principale inconnue est le parc de modules de connexions IoT, c'est-à-dire de machines et objets connectés à horizon 2030. La diffusion du numérique vers une multitude d'objets et d'usages rend les projections plus incertaines. Ces terminaux croissent très fortement dans toutes les variantes du scénario de déploiement. Le parc d'objets connectés passerait ainsi de 287 millions d'unités (48% des terminaux en nombre) en 2020 à entre 816 millions (68%) et 3,4 milliards d'unités (89%) en 2030 selon les variantes. Par exemple, dans la variante « La 5G du cahier des charges », leur consommation annuelle serait estimée à environ 33,5% de la consommation totale, soit plus de 12 TWh (cf. Graphique 29), en 2030. Dans « La vraie 5G pour tous », la multiplication par dix du nombre d'objets connectés par Français de plus de 16 ans, passant de 5 à 50 modules de connexion par individu en moyenne entre 2020 et 2030, augmenterait de plus de 25 TWh la consommation d'électricité en France.

Les terminaux du socle commun connaîtraient une évolution différente. En effet, ils sont modélisés à la baisse pour certains terminaux matures et fortement consommateurs d'énergie aujourd'hui, comme les ordinateurs fixes, les téléviseurs et les box internet ou TV. Les téléviseurs consommeraient par exemple moins de 14 TWh d'électricité en utilisation en 2030 contre plus de 20 TWh aujourd'hui.

Toutefois, la diminution de la consommation d'électricité du socle de terminaux ne suffit pas à compenser la hausse estimée pour les terminaux mobiles ou émergents.



Graphique 29. Consommation d'électricité en 2030 par terminal, pour la variante de déploiement « La 5G du cahier des charges »

### 3. Comparaison des émissions de gaz à effet de serre

L'empreinte carbone des usages numériques en France devrait augmenter dans la prochaine décennie, que le réseau 5G soit déployé ou non. Alors que cette augmentation se limiterait à +15% entre 2020 et 2030 sans déploiement, elle atteindrait entre +20% et +55% selon les modalités de déploiement de la 5G (cf. Graphique 30).

En variante centrale du déploiement, « La 5G du cahier des charges », l'empreinte carbone du numérique augmenterait de plus de 5 MtCO<sub>2</sub>eq entre 2020 et 2030, passant de 15,15 à 20,28 MtCO<sub>2</sub>eq soit une hausse de 34%. La différence avec les émissions de gaz à effet de serre projetées pour 2030 sans déploiement de la 5G est comprise entre 2,7 et 3,3 MtCO<sub>2</sub>eq (15 à 19 points de pourcentage).

A titre de comparaison, l'empreinte carbone de la France s'élève en 2018 à 749 MtCO<sub>2</sub>eq, soit 11,5 tCO<sub>2</sub>eq par habitant (HCC)<sup>54</sup>. Un chiffre relativement stable depuis plusieurs décennies. En effet, la baisse plutôt marquée des émissions sur le territoire national depuis 2005 est compensée par une hausse des émissions importées. Le numérique représente donc environ 2% de l'empreinte carbone de la France aujourd'hui. En cas de scénario pessimiste, c'est-à-dire de trajectoire stable de l'empreinte carbone de la France à horizon 2030, la part du numérique passerait à 2,7%. Si l'on retient au contraire un scénario optimiste et compatible avec la limitation du réchauffement climatique à 1,5°C, soit une empreinte carbone de la France en 2030 un peu inférieure à 500 MtCO<sub>2</sub>eq, ou 7,1 tCO<sub>2</sub>eq par habitant<sup>55</sup>, alors la part du numérique s'élèvera à 4,1% de l'empreinte totale des Français.

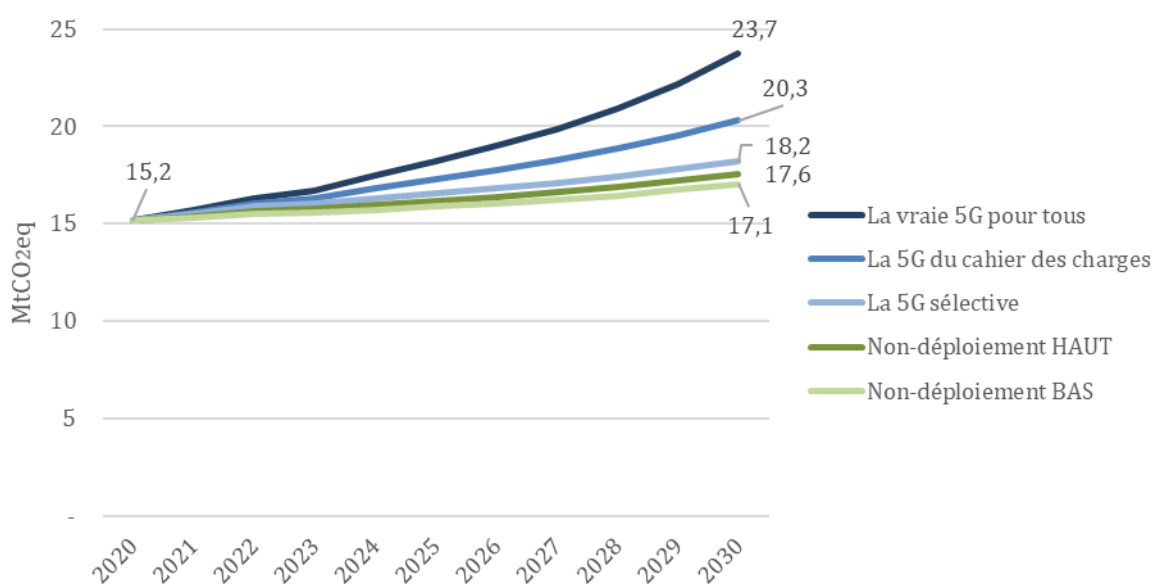
En différentiel par rapport au scénario de non-déploiement, l'impact de « La 5G sélective » serait modéré ; à tel point qu'un impact nul est possible puisque situé dans la marge d'erreur

<sup>54</sup> « [Maîtriser l'empreinte carbone de la France](#) », Haut Conseil pour le Climat (octobre 2020)

<sup>55</sup> *ibid*

des projections. Cela s'explique notamment par les substitutions entre réseaux qui ont été modélisées. En effet, un réseau 5G qui se limiterait à la couverture des zones très denses pour « désengorger » les bandes de fréquences attribuées aux générations mobiles précédentes, éviterait dans une certaine mesure la densification maximale du réseau 4G en centres-villes. Toutefois, en valeur absolue, l'empreinte carbone du numérique resterait en croissance de l'ordre de 20% sur la décennie selon « La 5G sélective ». Le numérique représenterait alors 3,7% de l'empreinte carbone de la France à horizon 2030, si les engagements français en matière de climat étaient par ailleurs tenus.

A l'inverse, un déploiement de « La vraie 5G pour tous » devrait entraîner une augmentation forte de l'empreinte carbone du numérique à horizon 2030, de l'ordre de 8,5 MtCO<sub>2</sub>eq par rapport à 2020 et plus de 6 MtCO<sub>2</sub>eq supplémentaires par rapport au scénario de non-déploiement. Le numérique pourrait ainsi représenter jusque 4,8% de l'empreinte carbone de la France en 2030.



Graphique 30. Emissions de gaz à effet de serre par variante

Les émissions de gaz à effet de serre des réseaux de télécommunications en France devraient croître significativement au cours de la prochaine décennie, que la 5G soit déployée (+55% à +145%) ou non (+46% à +52%). Cela s'explique par les projections de consommation d'énergie des réseaux qui sont toutes en hausse, comme évoqué dans les parties précédentes ; des hausses plus rapides que la baisse des facteurs d'émission. La part des réseaux dans l'empreinte carbone du numérique en France devrait croître mais rester très minoritaire avec 5% en 2020 contre 6,5% à 7,8% en 2030 selon les scénarios et variantes (cf. Graphique 31).

Contrairement aux réseaux, l'empreinte carbone des datacenters pourrait se réduire en cas de non-déploiement ou rester stable en cas de déploiement restreint selon les hypothèses de « La 5G sélective ». Une stabilisation voire une baisse de l'empreinte carbone des datacenters est possible selon deux conditions principales : d'une part le ralentissement de la croissance du trafic de données, et d'autre part la mise en service d'hyperdatacenters en France, qui stockeront et traiteront de plus en plus de données au détriment des datacenters à l'étranger



(qui consomment de l'électricité plus carbonée) et des petits datacenters en France (qui sont moins efficaces).

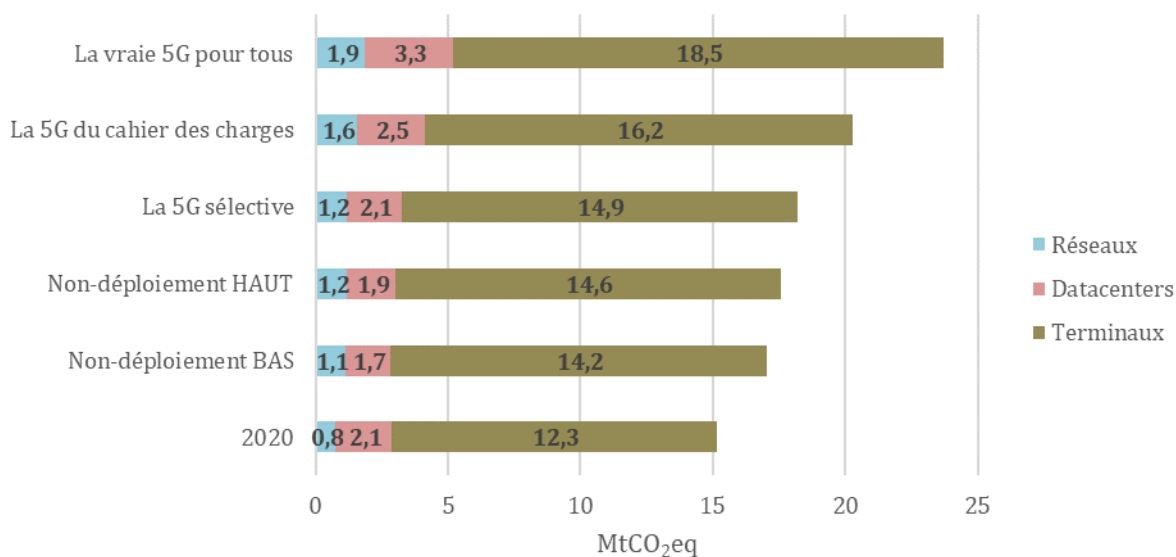
A l'inverse, l'empreinte carbone des datacenters pourrait croître de 20% (0,4 MtCO<sub>2</sub>eq supplémentaires) à 60% (1,2 MtCO<sub>2</sub>eq) à horizon 2030 selon « La 5G du cahier des charges » et « La vraie 5G pour tous » respectivement. Outre la poursuite ou l'accélération de la croissance historique du trafic de données, le déploiement de la 5G selon ces deux variantes devrait contribuer à la mise en service de nombreux datacenters de petites dimensions pour servir des usages au plus proche. Le traitement de données à proximité des usages (appelé *edge computing*) permet notamment de réduire la latence. Or c'est un gain de performance des télécommunications essentiel pour le développement de certains services en *cloud computing* (*cloud gaming*, réalité virtuelle et réalité augmentée en réseau, échanges entre véhicules vers la voiture pleinement autonome, etc.). Ces services sont autant de nouvelles fonctionnalités qui accompagneraient l'essor des terminaux mobiles émergents et des objets connectés. A nouveau, les liens entre sous-ensembles du numérique sont étroits ; et ce sont ces corrélations qui justifient la scénarisation adoptée dans la présente étude.

Les terminaux sont responsables de la grande majorité (81% avec 12,3 MtCO<sub>2</sub>eq en 2020) des émissions de gaz à effet de serre du numérique. En valeur absolue, l'augmentation des émissions de GES modélisée par variante est aussi principalement portée par les terminaux. En 2030, ils seraient responsables au maximum de 18,5 MtCO<sub>2</sub>eq, soit 78% des émissions totales, et au minimum de 14,2 MtCO<sub>2</sub>eq, soit 83% des émissions totales.

La marge d'incertitude est moins grande concernant l'évolution des émissions de gaz à effet de serre des terminaux, qu'elle n'est concernant leur empreinte énergétique. Cela s'explique notamment par le fait que l'empreinte carbone embarquée (amont) des objets connectés se limite aux modules de connexion, c'est-à-dire à la composante numérique définie comme périmètre dans notre étude. Or l'empreinte carbone embarquée des modules de connexion est relativement faible. Nous avons posé l'hypothèse d'1,5 kgCO<sub>2</sub>eq/unité en 2019, en hausse de 3% par an<sup>56</sup>, à comparer par exemple aux Smartphones avec 75 kgCO<sub>2</sub>eq/unité.

Une hausse de l'empreinte carbone des terminaux est anticipée dans toutes les variantes, que la 5G soit déployée ou non. Cela s'explique notamment par la poursuite de l'augmentation de la taille et de la définition moyennes des écrans dans de nombreux terminaux (écrans d'ordinateur, de télévision, de publicité, de Smartphones, etc.). De plus, les objets connectés devraient se répandre même sans déploiement de la 5G, avec un parc qui ferait un peu plus que doubler à horizon 2030.

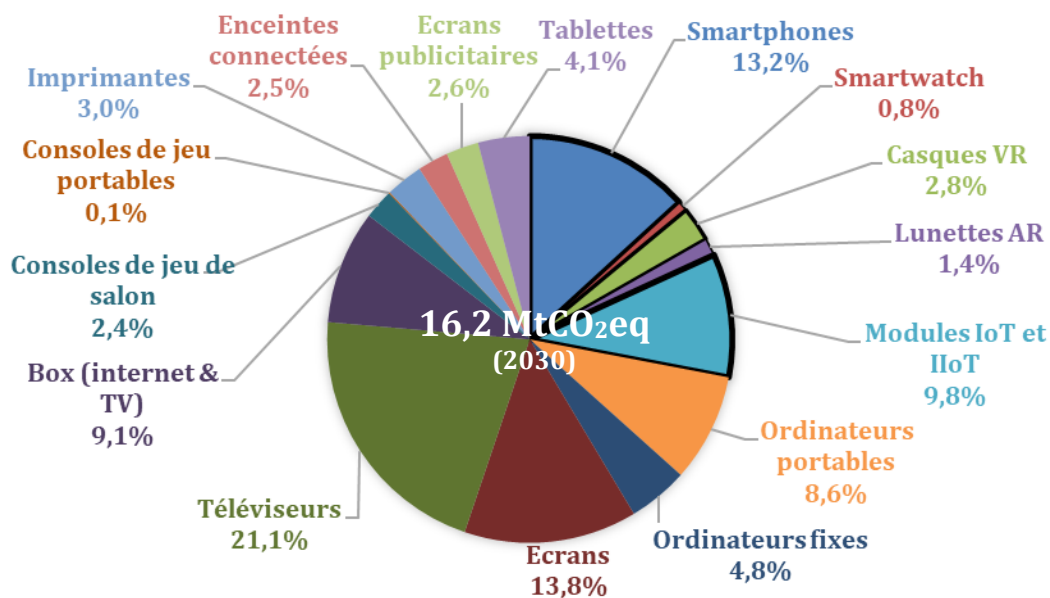
<sup>56</sup> Audition d'Hugues Ferreboeuf le 12 novembre 2020



Graphique 31. Emissions de gaz à effet de serre par variante et par sous-ensemble en 2030 et 2020

La croissance importante des émissions de GES s'explique notamment par l'augmentation des ventes des terminaux émergents. Parmi les terminaux, ce sont les modules de connexion IoT et IIoT qui connaissent la plus forte augmentation. En 2020, leur part est estimée à 14,9%, soit 1,8 MtCO<sub>2</sub>eq (cf. Graphique 32). En 2030, pour les variantes « non-déploiement BAS » et « la vraie 5G pour tous », ces terminaux seraient responsables de 18,1% à 37,1% des émissions de GES, soit respectivement 2,6 MtCO<sub>2</sub>eq et 6,9 MtCO<sub>2</sub>eq. Lorsqu'on s'intéresse à la variante « La 5G du cahier des charges », la part d'émissions de gaz à effet de serre des terminaux mobiles ou émergents serait de 28% (cf. Graphique 32), soit une hausse de 13 points de pourcentage par rapport à 2020. Comme pour les autres variantes, la hausse serait principalement portée par la généralisation des modules de connexion IoT et IIoT. En début de période leurs émissions de gaz à effet de serre sont estimées à 0,3 MtCO<sub>2</sub>eq, alors qu'à la fin de période elles seraient de 1,6 MtCO<sub>2</sub>eq.

Les émissions du « socle commun » de terminaux augmenteraient elles aussi sur la période. Cette hausse se limiterait à +10,5%, soit 1,1 MtCO<sub>2</sub>eq. Elle s'explique notamment par l'augmentation de la taille des écrans ainsi que de la complexité de certains terminaux, comme évoqué dans la partie « Hypothèses sur les terminaux ». La hausse serait donc portée par les émissions en phase amont, soit essentiellement l'empreinte carbone importée.



Graphique 32. Emissions de gaz à effet de serre en 2030 par terminal, pour la variante de déploiement "La 5G du cahier des charges"

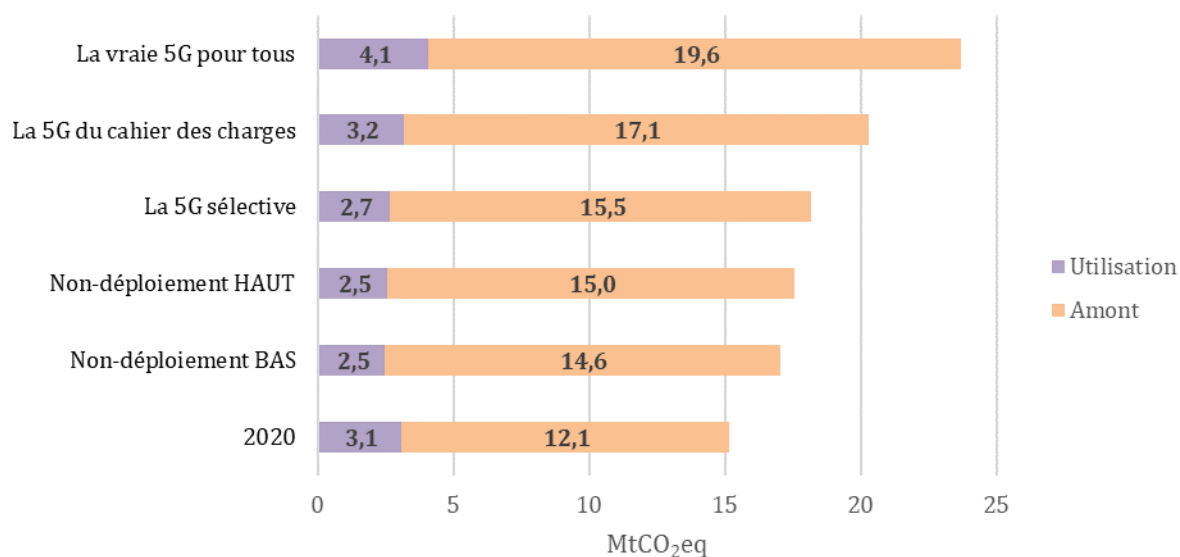
Les proportions des phases amont et utilisation sont inversées pour l’empreinte carbone par rapport à l’empreinte énergétique. Alors que la phase utilisation représenterait près de 80% de l’empreinte énergétique du numérique en 2020 (cf. Graphique 25), elle ne représenterait que 20% de l’empreinte carbone du secteur numérique en France (cf. Graphique 33). De plus, la part de la phase utilisation diminuerait encore à horizon 2030. Au maximum cette part passerait à 17,2% dans la variante « la vraie 5G pour tous » et au minimum à 14,5% dans la variante basse du scénario de non-déploiement.

La faible part des émissions en phase utilisation s’explique par l’intensité carbone de l’électricité consommée en France qui est parmi les plus faibles au monde<sup>57</sup>. Elle est bien plus faible que les facteurs d’émission appliqués en phase amont, que ce soit l’Intensité carbone de l’énergie primaire dans le monde ou les ratios émissions sur énergie embarquée des terminaux (cf. Hypothèses sur les terminaux).

La baisse de l’intensité carbone de l’électricité explique aussi pourquoi les émissions de gaz à effet de serre en phase utilisation devraient diminuer à horizon 2030 dans le scénario de non-déploiement et dans la variante « La 5G sélective » du scénario de déploiement.

Toutefois, cette diminution ne compenserait pas la croissance de celles imputées à la phase amont puisque, selon la variante, les émissions totales devraient augmenter de 13 à 57%.

<sup>57</sup> L’intensité carbone est faible en France car l’électricité est majoritairement issue de centrale nucléaire (70,6%). Cette source d’énergie génère peu d’émissions de gaz à effet de serre par rapport aux énergies utilisées dans d’autres centrales (exemple : charbon, gaz et pétrole).

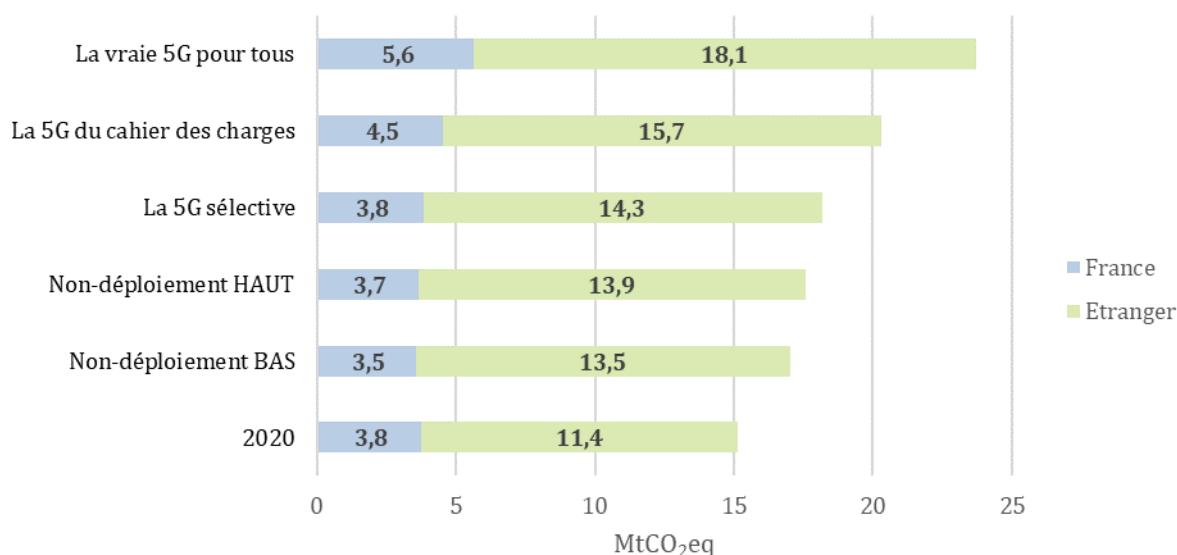


Graphique 33. Emissions de gaz à effet de serre par variante et par phase amont et utilisation en 2030 et 2020

Comme pour la consommation d'énergie, les usages numériques en France émettent des gaz à effet de serre depuis le territoire national mais aussi à l'étranger. L'empreinte carbone sur le territoire correspond à peu près aux phases utilisations des terminaux, réseaux et datacenters (seulement ceux situés en France). Quant à l'empreinte carbone importée, elle résulte surtout des phases amonts des trois sous-ensembles, puisque l'essentiel des équipements numériques y sont fabriqués, plus précisément en Asie du Sud-Est. La ventilation de l'empreinte carbone du numérique entre la France et l'étranger présentée ci-dessous (cf. Graphique 34) est donc presque identique à celle entre les phases utilisation et amont présentée ci-dessus.

La ventilation France-Etranger des émissions de gaz à effet de serre est basée sur les hypothèses émises pour l'indicateur de l'empreinte énergétique (cf. Graphique 26).

En somme, la hausse des émissions importées dans tous scénarios étudiés devrait s'ajouter à la hausse des émissions depuis le territoire national estimée dans « La vraie 5G pour tous » et « La 5G du cahier des charges », ou bien plus que compenser la baisse des émissions domestiques attendue dans les trois autres variantes.



Graphique 34. Emissions de gaz à effet de serre en France et à l'étranger en 2020 et par variante en 2030

La contradiction entre les projections de la présente étude quant à l'évolution de la consommation d'électricité du numérique en France et les projections inscrites à la dernière Programmation Pluriannuelle de l'Energie (PPE) n'interroge pas seulement sur le plan de la fiabilité du système électrique français, ou l'indépendance énergétique de la France par exemple. Il s'agit aussi d'un enjeu en matière de lutte contre le réchauffement climatique. En effet, alors que la trajectoire de l'intensité carbone employée pour cette étude se base sur des échanges avec l'ADEME et les projections de consommation électrique de la PPE, les résultats pointent vers un écart avec la PPE. Il y aurait donc un risque d'une planification trop faible du système électrique français à cause du numérique. Et ce risque pose question quant à la crédibilité des objectifs français de réduction de l'intensité carbone de l'électricité consommée en France. En effet, l'ordre d'appel de la production électrique est ainsi fait que les centrales au coût marginal le plus faible (éolien, solaire, nucléaire...) produisent le plus souvent ; c'est l'électricité dite « de base » et elle est la moins carbonée. Les périodes de pic de demande, qu'elles soient structurelles (l'hiver, à certaines heures de la journée, etc.) ou conjoncturelles (indisponibilité de réacteurs nucléaires par exemple) requièrent de faire appel aux centrales plus flexibles comme les centrales thermiques (notamment fossiles) ou bien à l'achat d'électricité à l'étranger. Que l'écart avec la PPE se traduise en importations d'électricité depuis les voisins européens, ou bien en recours plus fréquents aux centrales d'appoint (et non « de base ») plus carbonées, l'intensité carbone de l'électricité risque de diminuer moins vite que prévu dans cette étude. En termes économiques, il y a un problème d'endogénéité avec le paramètre de l'intensité carbone de l'électricité consommée en France.

Deux analyses de sensibilité ont été menées pour évaluer ce risque.

La première consiste à estimer que l'intensité carbone de l'électricité consommée en France se stabilise en 2022 à 44 gCO<sub>2</sub>eq/kWh et reste à ce niveau jusque 2030 (cf. courbe 1 dans le Graphique 4). Le paramètre serait supérieur de 33% à l'estimation principale du modèle (33 gCO<sub>2</sub>eq/kWh) en 2030. L'empreinte carbone du numérique en 2030 augmenterait seulement en conséquence de 1% (« Non-déploiement BAS ») à 2,1% (« La vraie 5G pour tous »). Cette hausse serait portée par les réseaux et datacenters, puisque la phase utilisation est relativement émettrice de gaz à effet de serre pour ces sous-ensembles. A l'inverse, l'importance de la phase amont dans l'empreinte carbone du numérique en France en

général et pour les terminaux en particulier explique pourquoi ce paramètre est assez peu sensible.

La deuxième analyse consiste à considérer que la différence de consommation électrique du numérique entre « La 5G du cahier des charges » et les trajectoires posées dans la PPE (simplifiées à -20% à horizon 2030) serait intégralement compensée par des importations d'électricité. Cette différence est croissante de 2021 à 2030, jusqu'à atteindre 31,6 TWh. L'intensité carbone de cette électricité importée suivrait la trajectoire optimiste posée pour la génération électrique en Union Européenne selon le « *Sustainable Development Scenario* » de l'IEA, soit une trajectoire linéaire de 269gCO<sub>2</sub>eq/kWh en 2018 à 72gCO<sub>2</sub>eq/kWh en 2030. Ainsi, l'empreinte carbone de cette surconsommation électrique du numérique en phase utilisation en France uniquement tendrait vers 2,3 MtCO<sub>2</sub>eq en 2030. Pire encore si nous comparons avec la variante « La vraie 5G pour tous », où l'écart serait de 53,4 TWh, soit un surplus de 3,8 MtCO<sub>2</sub>eq, en 2030.

L'étude des liens entre l'intensité carbone de l'électricité en France et l'évolution du secteur numérique gagnerait à être approfondie.

# Tables des illustrations

## Figures

Figure 1. Couverture 4G de la France métropolitaine au 4e trimestre 2019 .....	11
Figure 2. Schéma des réseaux de télécommunication et des interactions entre composantes (source : AFD, 2020).....	12
Figure 3. Schéma d'illustration des sites, sites-opérateurs et antennes.....	15
Figure 4. Schéma de la chaîne de valeur pour la fourniture d'accès mobile à internet (source : Citizing, 2020).....	17
Figure 5. Schéma des rôles des parties prenantes du réseau 5G (Source : 5GPPP Architecture Working Group, 2020).....	18
Figure 6. Schéma des relations entre terminaux, réseaux et datacenters.....	23
Figure 7. Classification des impacts du secteur numérique sur la consommation d'énergie et l'empreinte carbone .....	25
Figure 8. Représentation du périmètre d'étude en cercles.....	26
Figure 9. Schéma en cycle de vie .....	27
Figure 10. Stades de transformation de l'énergie depuis une ressource jusqu'au besoin....	28
Figure 11. Ressources d'énergie primaire et consommation d'énergie finale en France en 2018 représentées sous forme de diagramme Sankey.....	29
Figure 12. Matrice des scénarios pour les réseaux 5G.....	34
Figure 13. Frise des principales obligations du cahier des charges de l'Arcep aux opérateurs pour la 5G .....	35
Figure 14. Performances attendues des bandes de fréquences 5G.....	40
Figure 15. Découpage du territoire national en zones très denses, denses et peu denses....	42
Figure 16. La méthodologie d'estimation de l'empreinte carbone des réseaux .....	49
Figure 17. Les différents types de flux de données .....	50
Figure 18. La méthodologie d'estimation de l'empreinte carbone des terminaux.....	53
Figure 19. Représentation du sens d'évolution des paramètres d'estimation des terminaux du socle commun.....	55
Figure 20. Approche de modélisation pour les projections sur les smartphones.....	56
Figure 21. Approche de modélisation pour les projections des casques VR, lunettes AR et Smartwatch.....	60
Figure 22. Représentation du sens d'évolution des paramètres d'estimation des terminaux "mobiles".....	61

## Graphiques

Graphique 1. Projections du trafic de données mobile et fixe par variante .....	45
Graphique 2. Consommation d'électricité par terminal en 2020 .....	62
Graphique 3. Emissions de gaz à effet de serre par terminal en 2020 .....	62
Graphique 4. Nouvelle trajectoire de l'intensité carbone de l'électricité consommée en France .....	64
Graphique 5. Consommation d'énergie primaire des réseaux par variante du scénario de déploiement.....	67
Graphique 6. Consommation d'électricité en France des réseaux par variante du scénario de déploiement, en TWh.....	68
Graphique 7. Emissions de gaz à effet de serre des réseaux par variante du scénario de déploiement.....	68
Graphique 8. Consommation d'énergie primaire des datacenters par variante du scénario de déploiement.....	69
Graphique 9. Consommation d'électricité en France des datacenters par variante du scénario de déploiement .....	69



Graphique 10. Emissions de gaz à effet de serre des datacenters par variante du scénario de déploiement.....	70
Graphique 11. Consommation d'énergie primaire des terminaux par variante du scénario de déploiement.....	71
Graphique 12. Consommation d'électricité en France des terminaux par variante du scénario de déploiement .....	71
Graphique 13. Emissions de gaz à effet de serre des terminaux par variante du scénario de déploiement.....	72
Graphique 14. Consommation d'énergie primaire des réseaux par variante du scénario de non-déploiement .....	73
Graphique 15. Consommation d'électricité en France des réseaux par variante du scénario de de non-déploiement .....	73
Graphique 16. Emissions de gaz à effet de serre des réseaux par variante du scénario de non-déploiement .....	74
Graphique 17. Consommation d'énergie primaire des datacenters par variante du scénario de non-déploiement .....	75
Graphique 18. Consommation d'électricité en France des datacenters par variante du scénario de non-déploiement.....	75
Graphique 19. Emissions de gaz à effet de serre des datacenters par variante du scénario de non-déploiement .....	76
Graphique 20. Consommation d'énergie primaire des terminaux par variante du scénario de non-déploiement .....	76
Graphique 21. Consommation d'électricité en France des terminaux par variante du scénario de non-déploiement.....	77
Graphique 22. Emissions de gaz à effet de serre des terminaux par variante du scénario de non-déploiement .....	78
Graphique 23. Consommation d'énergie primaire par variante .....	81
Graphique 24. Consommation d'énergie primaire par variante et par sous-ensemble en 2030 et 2020 .....	82
Graphique 25. Consommation d'énergie primaire par variante et par phase amont et utilisation en 2020 et 2030.....	83
Graphique 26. Consommation d'énergie primaire en France et à l'étranger en 2020 et par variante en 2030.....	84
Graphique 27. Consommation d'électricité en France par variante.....	85
Graphique 28. Consommation d'électricité en France par variante et par sous-ensemble en 2030 et 2020 .....	86
Graphique 29. Consommation d'électricité en 2030 par terminal, pour la variante de déploiement « La 5G du cahier des charges ».....	87
Graphique 30. Emissions de gaz à effet de serre par variante.....	88
Graphique 31. Emissions de gaz à effet de serre par variante et par sous-ensemble en 2030 et 2020.....	90
Graphique 32. Emissions de gaz à effet de serre en 2030 par terminal, pour la variante de déploiement "La 5G du cahier des charges".....	91
Graphique 33. Emissions de gaz à effet de serre par variante et par phase amont et utilisation en 2030 et 2020.....	92
Graphique 34. Emissions de gaz à effet de serre en France et à l'étranger en 2020 et par variante en 2030.....	93

## Tableaux

Tableau 1. Mesures de performance par génération de réseau mobile et technologie .....	13
Tableau 2. Résumé du déploiement des bandes de fréquences 5G par zone.....	36
Tableau 3. Nombre de sites 5G nécessaires pour couvrir une zone équivalente à un site 4G, par bande et par zone .....	41
Tableau 4. Répartition de la population, des sites, des sites-opérateurs et des antennes 4G par zone.....	42
Tableau 5. Nombre de sites-opérateurs nécessaires pour couvrir 100% des zones, par bande de fréquence 5G et par zone .....	43
Tableau 6. Maillage 5G en 2030 par bande de fréquence et par variante de déploiement ...	44
Tableau 7. Consommation d'électricité par sites-opérateur 4G "multi générations" par variante .....	46
Tableau 8. Consommation d'électricité par site-opérateur 4G "seule" par variante .....	47
Tableau 9. Consommation électrique par site-opérateur et génération en 2020 et 2030 pour la variante de déploiement "La 5G du cahier des charges" .....	48
Tableau 10. Evolution de la durée moyenne d'utilisation des smartphones par variante ....	56
Tableau 11. Evolution du taux d'équipement des individus de 12 ans et plus en casques de réalité virtuelle par variante .....	57
Tableau 12. Evolution du taux d'équipement des individus de 16 ans et plus en lunettes de réalité augmentée par variante.....	58
Tableau 13. Evolution du taux d'équipement des individus de 12 ans et plus en montres et bracelets connectés par variante .....	59
Tableau 14. Evolution du taux de croissance annuel moyen des ventes et du parc de modules IoT et IIoT par variante.....	61
Tableau 15. Synthèse des consommations d'énergie primaire et d'émissions de gaz à effet de serre par sous-ensemble et par variante du scénario de déploiement.....	72
Tableau 16. Synthèse des consommations d'énergie primaire et d'émissions de gaz à effet de serre par sous-ensemble et par variante du scénario de non-déploiement en 2030 .....	72
Tableau 17. Synthèse des consommations d'énergie primaire et d'émissions de gaz à effet de serre par sous-ensemble et par variante du scénario de non-déploiement.....	78

# Bibliographie

Auteur	Mois	Année	Titre	Journal
Julien Lausson	Novembre	2020	Quel est le calendrier de la 5G en France ?	Numerama
ANFR	Août	2020	Actualité	
Jon Mundy	Mai	2020	How much data does 5G use?	5G.co.uk
Moblicity			MANAGING MOBILE DATA USAGE IN A 5G WORLD	
Dan Oliver	Juillet	2020	XL Axiata prepares for 10x hike in data usage with Ericsson's 5G Cloud Core	5Gradar.com
Research and Markets	Octobre	2019	Worldwide 4G to 5G Market Report 2019-2025: 5G Drives Data Usage, Increasing Consumption by 300%-1000% Compared with 4G	prnewswire.com
Joseph Waring	Mai	2020	5G drives threefold data jump in Korea	Mobile world
Robert Clark	Septembre	2020	Malaysia pushes 5G back to 2022	lightreading.com
Jon Brodtkin	Septembre	2020	AT&T's current 5G is slower than 4G in nearly every city tested by PCMag	ars technica
Les Echos	Janvier	2020	En Corée, dans les laboratoires de la 5G	Les Echos
Sam Azzemou	Août	2020	4G : saturé dès 2022, le réseau pourrait devenir affreusement lent	Phonandroid
Fredrik Jungermann	Février	2020	NINE MONTHS WITH 5G: 4.7 MILLION SUBS – EACH USING 27 GB PER MONTH	Tefficient
Steve Ranger	Juillet	2020	Les ventes de smartphones 5G explosent en Chine	ZDNet
Olivier Chicheportiche	Février	2020	Huawei est déjà le leader des ventes mondiales de smartphones 5G	BFM Business
Ariane Beky	Janvier	2020	Smartphones : la 5G pousse le marché à rebondir en 2020	Silicon.fr
Laura Wood	Octobre	2019	Worldwide 4G to 5G Market Report 2019-2025: 5G Drives Data Usage, Increasing Consumption by 300%-1000% Compared with 4G	Cision
Joseph Waring	Mai	2020	5G drives threefold data jump in Korea	Mobile World Live
Nicolas Six	Septembre	2020	Tour du monde des réseaux mobiles 5G : les particuliers ne sont pas conquis	Le Monde

Mathieu Chartier	Janvier	2020	Stéphane Richard parle de forfaits 5G Orange à un prix "attractif"	Les Numériques
IDC	Septembre	2020	La 5G va-t-elle envoyer des millions de smartphones à la poubelle?	BFM Business
Mathilde Damgé	Septembre	2020	Qu'est-ce que la 5G va changer pour les particuliers ?	Le Monde
Benoît Zagdoun Linh-Lan Dao	Septembre	2020	La 5G dangereuse, inutile, ou encore polluante ? On a examiné à la loupe les arguments des élus de gauche	France Télévision
Ken	Novembre	2018	Download Speeds: What Do 2G, 3G, 4G & 5G Actually Mean?	Ken's Tech Tips
TE connectivity		2018	Mass connectivity in the 5G era - preparing now for the future	
Ventobel		2018	5G - m'avenir de la connectivité	
P. Mesmer	Septembre	2020	En Corée du Sud, un déploiement de la 5G mené en marche forcée	Le Monde
ericsson		2020	Mobile data traffic outlook	
Robert Clark	Septembre	2020	China's 110M 5G subs can't overcome industry headwinds	
METIS II	Mars	2016	5G RAN Architecture and Functional Design	White paper
5GPPP	Février	2020	View on 5G Architecture	White paper
Orange	Mars	2018	Network slicing : « Une connectivité 5G innovante pour les véhicules connectés »	Hello Future
Sacha Kavanagh			Guide to Small Cells, HetNets and 5G	
Gauthier Roussilhe	Septembre	2020	Smartphones 4G/5G : comment évaluer la situation	
Cisco		2018	IEEE 802.11ax : la sixième génération du Wi-Fi	
Michael Cooney	Février	2019	Selon Cisco, le trafic mobile va exploser avec le WiFi 6 et la 5G	RESEAUX & TELECOMS
GSMA		2020	5G IoT Private & Dedicated Networks for Industry 4.0	
Padraig BELTON	Octobre	2020	China and COVID-19 speed up worldwide 5G adoption	LightReading
Mike Dano	Octobre	2020	5G users in US consume 1.9x more data than 4G users – report	Light Reading

Mike Dano	Octobre	2020	The next version of 5G expected to be delayed to 2022	Light Reading
GSMA	Mars	2019	Cloud AR/VR streaming	
Cedric Westphal - Huawei		2017	Challenges in Networking to Support Augmented Reality and Virtual Reality	IEEE ICNC
Forbes		2019	The Arrival Of 5G Will Unlock The Full Potential Of VR And AR	
BVA group		2018	Observatoire de la vie quotidienne des français. Les français et les objets connectés.	
IFOP		2014	L'Observatoire des Objets Connectés	
Christophe Auffray	Décembre	2018	Les montres connectées gagnent en popularité	ZDNet
Tractica	Mars	2016	560 MILLIONS DE PRODUITS WEARABLES EN 2021	VIPress
Research and Markets	Février	2020	Smartwatch Market Forecasts to 2030 - Global Sales of 722.12 Million Units is Projected for 2030; Garnering \$109+ Billion in Revenues	GlobeNewsWire
Christophe Auffray / Gfk	Septembre	2016	Montres connectées - Mais au fait, les consommateurs en veulent-ils réellement ?	ZDNet
Gfk	Mai	2017	GfK : plus d'un million de wearables vendus en France en 2016	objetconnecte.com
Idate Digiworld / JULIEN BERGOUNHOX	Novembre	2019	Le marché des casques AR/VR connaît une croissance de 50% par an	L'usine Digitale
Micaela Ideker	Mars	2014	Google Glass Materials	Design-life cycle
McKinsey	Janvier	2020	The 5G era - new horizons for advanced electronics and industrial companies	
Comité Stratégique de Filiale		2020	Contribution et éclairage du CSF Infrastructures numériques sur la question environnementale associée au numérique et à la 5G	
IEEE Spectrum		2018	The 5G Dilemma: More Base Stations, More Antennas— Less Energy?	
Gauthier Roussilhe		2020	La Controverse	

Aarne Mammela		2015	Energy efficiency in 5G Networks	IFIP Networking presentation in Toulouse
Zappone et al.		2016	A Survey of Energy-Efficient Techniques for 5G Networks and Challenges Ahead	IEEE
Agrawal et Mitra		2016	5G Mobile Technology: A Survey	ICT Express
Nokia		2017	5G network energy efficiency	White paper
Rizvi et al.		2017	An Investigation of Energy Efficiency in 5G Wireless Networks	International conference on circuits, system and simulation
Matinmikko et al.		2017	Using Scenario-based Business Modelling to Explore the 5G Telecommunication Market	Journal of Future Studies
Höfer, Bierwirth & Madlener		2019	Energie-Mehrverbrauch in Rechenzentren bei Einführung des 5G Standards	Presentation
Ge et al.		2017	Energy Efficiency Challenges of 5G Small Cell Networks	IEEE
Bieser et Hilty		2018	Assessing Indirect Environmental Effects of Information and Communication Technology (ICT): A Systematic Literature Review	Sustainability
J. Mongardini and A. Radzikowski	2020	Global smartphone sales may have peaked : what next ?	FMI	IEEE
Schneir et al.		2019	A business case for 5G mobile broadband in a dense urban area	Telecommunications Policy
A.A Garba		2020	5G Overview	
		2020	The evolution of gaming through 5G	
Nokia		2020	Cloud gaming and 5G	
newzoo		2019	The new reality for mobile gaming	
Deloitte.		2020	5G smart cities whitepaper	
Faisal Tariq and al		2019	A Speculative Study on 6G	IEEE Magazine
Mohamed Nadder Hamdy			Beamformers Explained	
CGET			Déployer un service de wifi territorial - fiches pratiques à l'usage des collectivités	L'europe s'engage en France

Cisco		2020	Cisco Annual Internet Report (2018–2023)	
Vo, Huynh. et al		2020	Life Cycle Assessment Summary Samsung Galaxy Watch	
Andrae		2017	Life Cycle Assessment of a Virtual Reality Device	
Ericsson		2019	More Capacity and Less Power: How 5G NR can Reduce Network Energy Consumption	



